

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

MAESTRÍA EN INGENIERÍA VIAL



**Análisis de la estabilidad de suelos y rocas blandas. Caso de estudio: tres taludes en la
Ruta Nacional No. 856**

Proyecto Final de Graduación para optar por el título de Máster en Ingeniería Vial

Grado académico de Maestría

Realizado por:

José Rafael Mena Carmona

Profesor tutor:

Domingo Ernesto Delgado Martínez

San José, Octubre de 2016

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, por haberme dado la vida, por sus bendiciones, por su infinita bondad y amor, por la salud, por acompañarme y guiarme en el buen camino y permitirme haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mis padres, quienes me dieron educación, apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos difíciles, por enseñarme que los sueños se logran a base de gran esfuerzo y dedicación y porque me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi empeño, mi perseverancia y mi coraje para conseguir mis objetivos. Al ingeniero Domingo Delgado Martínez, por su dirección, paciencia, confianza, por sus asesorías y atención de mis dudas, en general por su gran ayuda para poder concluir este proyecto. A mis profesores de la carrera, porque me han aportado gran conocimiento en cada etapa de mi camino universitario y por su gran apoyo y motivación para la elaboración de este proyecto de graduación.

José Mena

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco infinitamente a Dios, por haberme dado la fuerza y el valor para terminar esta etapa de mi vida. A mi madre y a mi padre, por apoyarme en todo momento, por los principios y valores que me han inculcado y sobre todo por ser ambos un excelente ejemplo de vida a seguir. Al ingeniero Domingo Delgado Martínez, por su confianza, conocimiento, experiencia, tiempo, dedicación, sus valiosos aportes y participación activa durante todo el desarrollo de este proyecto. A CONAVI, por todo el apoyo que recibí durante la elaboración de este proyecto. Al Instituto Tecnológico de Costa Rica, a todos los profesores de la carrera por el aprendizaje, el conocimiento que me transmitieron y todo el apoyo brindado a lo largo de la carrera. Al Dr. Andreas Mende, al geólogo Dr. Allan Astorga Gättgens y al licenciado Arnoldo Brenes, del Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto, así como al ingeniero Colin Thorne profesor de la Universidad de Nottingham en Reino Unido, por sus valiosos y trascendentales aportes en el desarrollo de esta investigación. Al ingeniero Juan Diego Bauzá Castelló, en España, por su colaboración con los aportes bibliográficos utilizados en este estudio. Al ingeniero Jonathan Granados Castillo, por su valiosa colaboración en el proceso de la toma de muestras; a Steven Segura Arias, por el apoyo brindado en el logro de esta investigación; al topógrafo William Vásquez, por sus aportes en los levantamientos topográficos y toma de muestras; al señor William Ulate, por su apoyo en la toma de muestras. Al geólogo Fernando Montalto, por transmitir su gran conocimiento y sus valiosos consejos. A la Policía de Fronteras en las Tablillas, y al Comando Policial, en Los Chiles, por su apoyo en la seguridad durante el levantamiento de los datos de la ruta; a los pilotos de la Fuerza Pública, por su valiosa colaboración en los vuelos realizados.

A todos los que estuvieron a mí alrededor y que, de una u otra manera, brindaron el apoyo incondicional en el desarrollo de todo este proyecto.

A todos los que me apoyaron para escribir y concluir esta tesis.

¡Gracias!

José Mena

*“Para lograr grandes cosas debemos no sólo
actuar, sino también soñar; no sólo planear sino
también creer.”*

*Anatole France (1844-1924)
Escritor francés.*

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
EPÍGRAFE	IV
ÍNDICE GENERAL	V
ÍNDICE DE CUADROS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
GLOSARIO	X
ABREVIATURAS	XIV
RESUMEN	XVI
ABSTRACT	XVII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1 . GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	3
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.3. OBJETIVOS	5
1.3.1. <i>Objetivo general</i>	5
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i>	5
1.4. ALCANCE Y LIMITACIONES	6
1.4.1. <i>Alcance</i>	6
1.4.2. <i>Limitaciones</i>	6
CAPÍTULO 2 . MARCO TEÓRICO	7
2.1. NOMENCLATURA DE UN TALUD O LADERA	7
2.2. MOVIMIENTO DE LOS TALUDES Y LADERAS	8
2.2.1. <i>Clasificación de los movimientos de masa</i>	9
2.3. ASPECTOS GENERALES SOBRE LA INESTABILIDAD DE TALUDES Y LADERAS	14
2.4. RECONOCIMIENTOS GENERALES DE ZONAS INESTABLES	17
2.4.1. <i>Reconocimientos previos de campo</i>	17
2.4.2. <i>Investigación de detalle</i>	18
2.4.3. <i>Toma de muestras</i>	19
2.5. ENSAYOS GEOFÍSICOS. SÍSMICA DE REFRACCIÓN	20
2.6. CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE LOS MACIZOS ROCOSOS	22
2.7. MODELOS CONSTITUTIVOS DE RESISTENCIA CORTANTE EN SUELOS	25
2.7.1. <i>Criterios de rotura de la matriz rocosa</i>	27
2.8. RESISTENCIA AL CORTANTE. CONDICIONES DRENADAS Y NO DRENADAS	30
2.8.1. <i>Estabilidad a corto y a largo plazo</i>	32
2.9. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES	33
2.9.1. <i>Equilibrio límite y factor de seguridad</i>	34
2.9.2. <i>Selección del factor de seguridad</i>	36
2.9.3. <i>Métodos de dovelas</i>	38
2.9.4. <i>Grietas de tensión en los análisis de estabilidad</i>	39
2.9.5. <i>Cargas sísmicas</i>	41
2.10. MODELADO DE TALUDES	41
2.11. CALIBRACIÓN DEL MODELO: CONCEPCIÓN GENERAL DEL MODELADO EN LA INGENIERÍA CIVIL	42
2.12. PROPUESTAS DE SOLUCIÓN	45

CAPÍTULO 3 . MARCO METODOLÓGICO	50
3.1. SELECCIÓN DEL CASO DE ANÁLISIS Y LOS TALUDES OBJETO DE ESTUDIO	50
3.2. ANÁLISIS DE ALGUNAS DE LAS METODOLOGÍAS MÁS IMPORTANTES EN EL ESTUDIO DE TALUDES Y LADERAS	53
3.2.1. <i>Análisis y discusión de las invariantes (etapas)</i>	55
3.3. DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL ESQUEMA METODOLÓGICO DE INVESTIGACIÓN.....	57
3.3.1. <i>Etapas de estudios preliminares</i>	58
3.3.1.1. Investigación de la geología regional	58
3.3.1.2. Inspección visual de campo.....	58
3.3.1.3. Planificación del estudio detallado.....	60
3.3.2. <i>Etapas de la investigación detallada</i>	60
3.3.2.1. Levantamiento topográfico	61
3.3.2.2. Planimetría y sección crítica	61
3.3.3. <i>Ejecución de los ensayos directos e indirectos y toma de muestras</i>	61
3.3.3.1. Clasificación geomecánica de Bieniawski o RMR (<i>Rock Mass Rating</i>)	61
3.3.3.2. Sísmica de refracción.....	61
3.3.3.3. Ensayos de perforación SPT.....	63
3.3.3.4. Toma de muestras inalteradas	63
3.3.3.5. Ensayo de corte directo.....	63
3.3.3.6. Caracterización de las propiedades físicas y mecánicas del suelo.....	64
3.3.4. <i>Etapas de modelado y calibración del modelo geotécnico</i>	64
3.3.4.1. Generación del modelo geotécnico.....	65
3.3.4.2. Modelado preliminar.....	65
3.3.4.3. Proceso de calibración: retrocálculo y convergencia.	66
3.3.5. <i>Etapas de diseño y recomendaciones constructivas</i>	67
3.3.5.1. Propuesta de solución	67
3.3.5.2. Modelo de la solución propuesta	67
3.3.5.3. Revisión de criterios	67
3.3.5.4. Perfil geotécnico de la propuesta	68
CAPÍTULO 4 . ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	69
4.1. CASO DE ESTUDIO: TALUDES EN LA RN NO. 856, SECCIÓN 1, TRAMO RÍO POCOSOL-RÍO INFIERNITO	69
4.1.1. <i>Etapas preliminar de investigación</i>	69
4.1.1.1. Información preliminar.....	69
4.1.1.2. Inspección visual de campo.....	72
4.1.1.3. Selección de los taludes objeto de estudio	72
4.1.1.4. Volúmenes de trabajo por talud.....	77
4.1.2. <i>Etapas detallada de la investigación</i>	77
4.1.2.1. Clasificación geomecánica de Bieniawski (RMR)	77
4.1.2.2. Sísmica de refracción.....	79
4.1.2.3. Ensayo de penetración SPT	85
4.1.2.4. Toma de muestras inalteradas	86
4.1.2.5. Caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos y rocas blandas	87
4.1.2.6. Ensayo de corte directo.....	89
4.1.3. <i>Etapas de modelado y diseño</i>	89
4.1.3.1. Generación del modelo geotécnico.....	89
4.1.3.2. Proceso de modelado y calibración del modelo geotécnico	93
4.1.3.3. Propuesta de solución del caso	103
CAPÍTULO 5 . CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	114
5.1. CONCLUSIONES.....	114
5.2. RECOMENDACIONES	115
CAPÍTULO 6 . REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	116
CAPÍTULO 7 . APÉNDICES.....	124
CAPÍTULO 8 . ANEXOS	191

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1. Factores que influyen en la estabilidad de las laderas naturales.	15
Cuadro 2.2. Evaluación del grado de meteorización del macizo rocoso	22
Cuadro 2.3. Determinación de la clase del macizo rocoso	23
Cuadro 2.4. Relación entre el RQD y la calidad de la roca	24
Cuadro 2.5. Criterios para seleccionar un factor de seguridad para diseño de taludes.....	36
Cuadro 2.6. Intervalos de FS y criterios de vulnerabilidad	36
Cuadro 2.7. Factores de reducción y seguridad para distintos aspectos geotécnicos	37
Cuadro 2.8. Factores de seguridad para el diseño de taludes permanentes y análisis de laderas	37
Cuadro 2.9. Coeficientes pseudoestáticos horizontales para	41
Cuadro 2.10. Propuestas de varios autores para la solución a la inestabilidad de taludes.	47
Cuadro 4.1. Resumen de los volúmenes de ensayos realizados a los tres taludes en estudio.....	77
Cuadro 4.2. Valores de clasificación geomecánica de Bieniawski (1989) para los taludes en estudio	78
Cuadro 4.3. Determinación de la clase del macizo rocoso	79
Cuadro 4.4. Propiedades físico mecánicas estimadas del macizo rocoso.....	79
Cuadro 4.5. Resultados del perfil sísmico en el sitio del talud T-8a	79
Cuadro 4.6. Propiedades sísmicas del talud T-8a.....	80
Cuadro 4.7. Resultados del perfil sísmico en el sitio del talud T-40	81
Cuadro 4.8. Propiedades sísmicas del talud T-40	82
Cuadro 4.9. Resultados del perfil sísmico en el sitio del talud T-56	83
Cuadro 4.10. Propiedades sísmicas del talud T-56	84
Cuadro 4.11. Velocidades de onda y propiedades por capa geofísica.....	84
Cuadro 4.12. Resultados de las perforaciones con el ensayo SPT en los taludes en estudio	86
Cuadro 4.13. Intervalos profundidad de Capa 1	87
Cuadro 4.14. Intervalos profundidad de Capa 2.....	87
Cuadro 4.15. Intervalos profundidad de Capa 3.....	88
Cuadro 4.16. Intervalos profundidad de Capa 4.....	88
Cuadro 4.17. Resumen de la caracterización de las propiedades físicas de las capas de los taludes en estudio	89
Cuadro 4.18. Valores de c' y ϕ' de acuerdo con los ensayos de corte directo	89
Cuadro 4.19. Valores de c y ϕ de acuerdo con los ensayos de corte directo (UU).....	89
Cuadro 4.20. Parámetros de resistencia al cortante retrocalculados basados en la superficie de falla, talud T-8a.....	94
Cuadro 4.21. Parámetros de resistencia al cortante retrocalculados basados en la superficie de falla, talud T-40	95
Cuadro 4.22. Parámetros de resistencia al cortante retrocalculados basados en la superficie de falla, talud T-56	96
Cuadro 4.23. Intervalos de valores para el proceso de calibración y valores de convergencia en cada talud	97
Cuadro 4.24. Parámetros de resistencia calibrados en condición de frente húmedo	98
Cuadro 4.25. Factores de seguridad para la ladera del sitio del talud T-8a.....	102
Cuadro 4.26. Factores de seguridad para la ladera del sitio del talud T-40.....	102
Cuadro 4.27. Factores de seguridad para la ladera del sitio del talud T-56.....	102
Cuadro 4.28. Factores de seguridad para el corte en el talud T-8a.....	102
Cuadro 4.29. Factores de seguridad para el corte en el talud T-40	102
Cuadro 4.30. Factores de seguridad para el corte en el talud T-56	103
Cuadro 4.31. Factores de seguridad de la solución propuesta talud T-8a	103
Cuadro 4.32. Factores de seguridad de la solución propuesta talud T-40	106
Cuadro 4.33. Factores de seguridad de la solución propuesta talud T-56.....	109
Cuadro 4.34. Recomendaciones de estabilización de taludes	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Nomenclatura y partes generales de los taludes y laderas.	7
Figura 2.2. Superficie de falla.	9
Figura 2.3. Nomenclatura de las partes de un deslizamiento	10
Figura 2.4. Relación D/L en deslizamientos	11
Figura 2.5. Desplazamientos de rotación	12
Figura 2.6. Ejemplos de deslizamiento de traslación	12
Figura 2.7. Ejemplos de fallas de rotación en la RN No. 856	13
Figura 2.8. Ejemplo de deslizamiento de traslación en RN No. 856.....	13
Figura 2.9. Los Chorros de Barú, Pérez Zeledón	13
Figura 2.10. San Rafael Debajo de Desamparados	13
Figura 2.11. San Ignacio de Acosta.....	14
Figura 2.12. Ruta No. 1 Naranjo-Palmare	14
Figura 2.13. Ruta No. 27 kilómetro 45	14
Figura 2.14. Ruta No. 32 kilómetro 29	14
Figura 2.15. Procedimiento general para la toma de muestras inalteradas.....	20
Figura 2.16. Esquema de los métodos geofísicos.....	20
Figura 2.17. Método de refracción sísmica.....	21
Figura 2.18. Modelo de dos capas en sísmica de refracción	21
Figura 2.19. Formulación básica del modelo elastoplástico.....	27
Figura 2.20. Ejemplos de métodos de análisis de estabilidad de taludes	35
Figura 2.21. Esquema del sistema de análisis con dovelas	38
Figura 2.22. Esquema estático del método Morgenstern y Price	39
Figura 3.1. Colapso de obras de mitigación	51
Figura 3.2. Ubicación de la zona de estudio	52
Figura 3.3. Sobrevuelo de taludes inestables en sección 3, RN No. 856	52
Figura 3.4. Sobrevuelo de taludes en sección 2, RN No. 856.....	53
Figura 3.5. Diagrama de flujo del procedimiento metodológico empleado para el análisis de estabilidad de taludes en suelos y rocas blandas en la RN No. 856	59
Figura 3.6. Sismógrafo SmartSeis ST	62
Figura 3.7. Dispositivo general de los perfiles sísmicos de refracción realizados	62
Figura 4.1. Inventario de taludes en la sección 2, RN No. 856	70
Figura 4.2. Mapa sinóptico de las principales litologías del Arco de Sarapiquí (modificado de Obando, 1995).....	71
Figura 4.3. Taludes seleccionados para el estudio	73
Figura 4.4. Ficha de observación talud T-8a.....	74
Figura 4.5. Ficha de observación talud T-40.....	75
Figura 4.6. Ficha de observación talud T-56.....	76
Figura 4.7. Área de afloramiento evaluada para RMR.....	77
Figura 4.8. Perfil de sísmica de refracción longitudinal E-O al talud T-8a.....	80
Figura 4.9. Perfil de sísmica de refracción transversal N-S al talud T-8a.....	80
Figura 4.10. Perfil de sísmica de refracción extremo este Talud T-40.....	81
Figura 4.11. Perfil de sísmica de refracción extremo oeste Talud T-40.....	82
Figura 4.12. Perfil de sísmica de refracción longitudinal E-O al talud T-56.....	83
Figura 4.13. Perfil de sísmica de refracción Transversal N-S al talud T-56	83
Figura 4.14. Zona de perforación y muestra de suelos, talud T-8a	85
Figura 4.15. Zona de perforación y muestra de suelos, talud T-40	85
Figura 4.16. Zona de perforación y muestra de suelos talud T-56	86
Figura 4.17. Muestra inalterada #2 en capa 2, talud T-40.....	86
Figura 4.18. Perfil geotécnico del talud T-8a a) Levantamiento topográfico en planta, b) Perfil geotécnico	90
Figura 4.19. Perfil geotécnico del talud T-40 a) Levantamiento topográfico en planta, b) Perfil geotécnico.....	91
Figura 4.20. Perfil geotécnico del talud T-56 a) Levantamiento topográfico en planta b) Perfil geotécnico	92
Figura 4.21. Situación antes y después de los taludes en estudio.....	93
Figura 4.22. Calibración del modelo en condición estática con nivel freático para el Talud T-8a	98
Figura 4.23. Calibración del modelo en condición estática con nivel freático para el Talud T-40.....	99
Figura 4.24. Calibración del modelo en condición estática con nivel freático para el Talud T-56.....	99

Figura 4.25. Calibración del modelo en condición de frente húmedo para el Talud T-8a	100
Figura 4.26. Calibración del modelo en condición de frente húmedo para el Talud T-40	100
Figura 4.27. Calibración del modelo en condición de frente húmedo para el Talud T-56	101
Figura 4.28. Estabilidad del Talud T-8a condición estática con NF	104
Figura 4.29. Estabilidad del Talud T-8a condición estática sin NF	104
Figura 4.30. Estabilidad del talud T-8a condición frente húmedo	105
Figura 4.31. Estabilidad del Talud T-8a condición pseudoestática	105
Figura 4.32. Perfil geotécnico de propuesta de solución para el talud T-8a.....	106
Figura 4.33. Estabilidad del Talud T-40 condición estática con NF	107
Figura 4.34. Estabilidad del Talud T-40 condición estática sin NF	107
Figura 4.35. Estabilidad del talud T-40 condición frente húmedo	108
Figura 4.36. Estabilidad del Talud T-40 condición pseudoestática.....	108
Figura 4.37. Perfil geotécnico de propuesta de solución para el talud T-40	109
Figura 4.38. Estabilidad del Talud T-56 condición estática con NF	110
Figura 4.39. Estabilidad del Talud T-56 condición estática sin NF	110
Figura 4.40. Estabilidad del talud T-56 condición frente húmedo	111
Figura 4.41. Estabilidad del Talud T-56 condición pseudoestática.....	111
Figura 4.42. Perfil geotécnico de propuesta de solución para el talud T-56	112

GLOSARIO

A

Alteración hidrotermal: Proceso geológico en el cual sedimentos o rocas sufren los efectos de la circulación de fluidos a altas temperaturas y químicamente activos. Proceso de metamorfismo mediante el cual los minerales de las rocas se alteran por acción de las soluciones hidrotermales a alta temperatura. Las alteraciones hidrotermales son indicadores de la presencia de yacimientos minerales de origen hidrotermal.

C

Calibración: Proceso iterativo con el que, con base en variables obtenidas de ensayos reales, se logra obtener con una aproximación adecuada la correspondencia de un modelo geotécnico con el fenómeno físico que se estudia, con el fin de lograr la estabilidad de la solución requerida. La calibración de un modelo geotécnico consiste en analizar la morfología antes de la falla del talud por medio de observaciones de campo.

Cárcava: Pequeño barranco estrecho y profundo formado por la acción erosiva de las aguas de lluvia.

Coefficiente pseudoestático: Coeficiente sísmico que se utiliza en el análisis pseudoestático de taludes, que, multiplicado por el peso del elemento, equivale usualmente a la fuerza horizontal que recibe el suelo del talud durante el sismo. Esta fuerza es aplicada sobre todos los elementos analizados del talud.

Compresión confinada: (Llamada también "compresión simple" o "compresión uniaxial") esfuerzo de compresión bajo el cual un espécimen de suelo cilíndrico no confinado falla durante la aplicación del ensayo de compresión simple y consiste en la carga máxima por unidad de área alcanzada o la carga por unidad de área obtenida al 15% de la deformación axial, la que ocurra primero. Es un ensayo que se utiliza para obtener rápidamente la resistencia a la compresión no drenada de los suelos que poseen suficiente cohesión como las arcillas.

D

Deslizamiento: Desplazamiento de corte de suelo, rocas blandas, rellenos artificiales o combinaciones de los mismos, a lo largo de una o varias superficies, cuyo movimiento puede ser progresivo; puede ser una sola masa o varias unidades de masas que se mueven, ya sea por causas naturales o antrópicas.

Detritos: Resultado de la descomposición de una masa sólida en partículas.

Diaclasa: Fractura en las rocas que no va acompañada de deslizamiento de los bloques que determina, no siendo el desplazamiento más que una mínima separación transversal. Son estructuras muy abundantes. Son deformaciones frágiles de las rocas.

Discontinuidades: Superficies o planos de separación preferentes de alteración que condicionan de una forma definitiva las propiedades de las rocas, haciéndolas más deformables y débiles.

E

Elastoplasticidad: Propiedad de un material que adopta un comportamiento elástico lineal hasta un valor de esfuerzo llamado tensión de proporcionalidad, es un material que presenta plasticidad perfecta de modo que las ecuaciones constitutivas no necesitan incluir variables internas ni esfuerzos conjugados asociados y el problema elastoplástico es más sencillo.

Estabilidad: Estado y condición de una estructura o de una masa de material cuando puede soportar los esfuerzos aplicados durante largo tiempo sin sufrir una deformación o movimiento apreciable que no se recupere o devuelva al retirar la carga.

F

Familia de discontinuidades: Conjunto de discontinuidades presentes en el macizo rocoso que tienen orientaciones similares y el mismo origen. El número de familias de discontinuidades, entre otras características, define el comportamiento del macizo rocoso, permite determinar el grado en que puede deformarse.

G

Geófono: Transductor de desplazamiento, velocidad o aceleración que convierte el movimiento del suelo en una señal eléctrica. Casi todos los geófonos empleados para la prospección sísmica en la superficie terrestre son del tipo electromagnético.

H

Hidrosiembra: Técnica que consiste en la proyección sobre el terreno de una mezcla acuosa de semillas, *mulch*, fertilizantes y sustancias adherentes, con el fin de promover la revegetación. De fácil aplicación a gran escala porque se realiza con medios mecánicos especializados (hidrosembradora) dotados de equipos de bombeo. Se usa frecuentemente en restauración de taludes, minas y canteras, es utilizada para luchar contra la erosión y la desestabilización de taludes o terrenos poco consolidados.

I

***in situ*:** Expresión latina que significa “en el sitio” o “en el lugar”, suele utilizarse para describir un fenómeno observado en el lugar o una manipulación realizada en el lugar.

Inclinómetro: Instrumento de control, principalmente utilizado para medir la deformación bajo la superficie horizontal en un pozo de sondeo. Se puede utilizar para controlar la deformación lateral del suelo y la roca en las diferentes aplicaciones geotécnicas. Los inclinómetros deben alcanzar la zona estable situada debajo del plano de rotura más profundo, constan de un torpedo que baja por una tubería especial previamente instalada en el interior del sondeo. Permite ir conociendo los desplazamientos horizontales a lo largo del sondeo.

Intemperismo: Proceso de degradación y descomposición que sufren las rocas y los minerales debido a la acción de agentes atmosféricos. Es la acción combinada de procesos (climáticos, biológicos, entre otros) mediante los cuales la roca es descompuesta y desintegrada por la exposición continua a los agentes atmosféricos, transformando a las rocas masivas y duras en un manto residual finamente fragmentado. Puede ser de dos formas, fundamentalmente mecánico o físico, que corresponde con la degradación de la roca en fragmentos cada vez más pequeños; o bien predominantemente químico, que consiste en la descomposición de los componentes originales de la roca a otros diferentes.

L

Ladera: Masa de tierra que no es plana, sino que posee pendiente o cambios de altura significativos, como resultado de un proceso natural.

M

Modelado: Representación de un objeto, sistema o idea para ayudar a explicar, entender, manipular o mejorar un sistema mediante la abstracción de las propiedades dominantes del objeto. Es la simulación de un fenómeno que no puede ser observado directamente, o que lo es con dificultad, por medio de la descripción, datos estadísticos, o analogías.

Modelo constitutivo: Conjunto de ecuaciones que describen el comportamiento de un material en términos de sus relaciones esfuerzo/deformación. Los modelos generalmente están expresados en forma de ecuaciones diferenciales de manera que los incrementos infinitesimales de esfuerzos están asociados con incrementos infinitesimales de deformaciones.

Modelo pseudoestático: Representación simplificada de la realidad de un talud o ladera, que se analiza tomando en cuenta los efectos producidos por la fuerza horizontal que recibe el talud durante el sismo, aplicada en todos los

elementos analizados del talud y haciendo uso de un coeficiente sísmico multiplicado por el peso del elemento. Este modelo calcula el factor de seguridad de la estabilidad de taludes por el método de equilibrio límite adicionando un coeficiente lateral sísmico, el cual depende de la sismicidad del país y es de naturaleza semi-empírica.

Modelo saturado: Representación simplificada de la realidad de un talud o ladera que se analiza en el caso más desfavorable frente a cargas, deformaciones, hinchamiento y colapso, en particular materiales arcillosos donde los valores de permeabilidad son muy bajos y presentan un sistema bifásico (fase sólida y fase líquida), donde predomina el esfuerzo efectivo y presión intersticial positiva.

Modelo estático: Representación simplificada de la realidad de un talud o ladera, el cual se analiza por medio del método de equilibrio límite que asumen condiciones de equilibrio estático para una superficie de deslizamiento propuesta y no incluye el análisis de las deformaciones.

N

Nivel freático: Lugar geométrico de puntos del suelo en los que la presión del agua es igual a la presión atmosférica. Corresponde al lugar geométrico de los niveles que alcanza la superficie de agua en los pozos de observación y varía en un punto con respecto a las variaciones de precipitación, presión atmosférica y con las mareas. Constituye una cota absoluta correspondiente a la parte superior de saturación en un acuífero libre.

O

Ondas P: Ondas longitudinales y compresionales, que provocan que el suelo sea alternadamente comprimido y dilatado en la dirección de la propagación. Son ondas de volumen que viajan a través del interior del planeta, inclusive a grandes profundidades. Estas ondas son las que se propagan a mayor velocidad, por lo que son las primeras en ser registradas.

P

Presión de poros: (Llamada también "presión neutra") presión interna del agua de saturación en los poros del suelo que se presenta cuando existe un nivel de capilaridad; cuando llega a cierto valor, el suelo se vuelve inestable debido a que las partículas pierden cohesión entre sí debido a que se disminuyen los esfuerzos normales efectivos entre las partículas.

R

Roca blanda: Material de origen arcilloso o limoso que presenta una marcada cementación, y cuyo comportamiento mecánico se sitúa en un punto intermedio entre los suelos y las rocas. Roca que se descascarilla al ser expuesta al aire, o al agua, o bien proporciona un sonido sordo al ser golpeada por un martillo y en la que el porcentaje de recuperación de los testigos en los sondeos son bajos, del orden de 35% o inferior. Término utilizado como sinónimo amplio de "roca sedimentaria". Rocas que pueden fallar a través del material intacto a los niveles de esfuerzo existentes cerca de una excavación. Corresponde a materiales rocosos que no pueden ser excavados o removidos eficientemente con herramientas manuales y requieren para su excavación y remoción herramientas mecánicas de potencia y modo de operación equivalente a los martillos neumáticos.

Retrocálculo: Determinación de la configuración de la superficie de falla del deslizamiento relativa a la topografía en el instante en que ocurrió la falla, modelando y ajustando los parámetros de resistencia al cortante del suelo hasta obtener un FS igual a 1. Es el proceso para determinar o estimar la resistencia al cortante del material, presión de poro u otras condiciones de un talud y establecer un modelo conveniente del talud a partir de la falla. Las propiedades retrocalculadas son utilizadas para diseñar medidas correctivas de estabilidad de taludes.

S

Sondeo: Tipo de prospección utilizado para el reconocimiento del terreno del cual se obtienen muestras para realizar los ensayos. Se utilizan para alcanzar mayor profundidad que con una calicata o penetrómetro, para ver el nivel freático o atravesar suelos resistentes y roca.

Suelo: Cualquier agrupación de partículas minerales, cementadas débilmente o no cementadas, formadas por la meteorización de la roca y con espacios entre las partículas ocupados por agua y aire que contiene una amplia variedad de materiales tales como grava, arena, limos y mezclas arcillosas.

Suelo residual: Suelo producido por la meteorización y descomposición de la roca *in situ*, que no ha sido transportado de su localización original. Se encuentra predominantemente en zonas tropicales y son muy heterogéneos. Las partículas de suelo residual con frecuencia consisten en agregados o minerales de material meteorizado que se rompen y se vuelven progresivamente finos, si el suelo es manipulado.

Succión: Habilidad de un suelo no saturado para atraer o retener agua en términos de presión. Si los efectos de la gravedad, la temperatura y la inercia no se toman en cuenta, los mecanismos responsables para la atracción son la capilaridad, mecanismos de hidratación de corto alcance y mecanismos osmóticos. Los mecanismos osmóticos y de hidratación pueden ocurrir tanto en suelos saturados como en no saturados. El mecanismo de capilaridad es único de suelos no saturados.

T

Talud: Masa de tierra que no es plana, sino que posee pendiente o cambios de altura significativos y es conformada artificialmente.

Terraplén: Tierra con que se rellena un terreno para levantar su nivel y formar un plano de apoyo adecuado para hacer una obra.

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

<i>AASHTO</i>	American Association of State Highway and Transportation Officials
<i>ACG</i>	Asociación Costarricense de Geotecnia
<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials
c_1	Factor de corrección que considera la longitud de la barra en el ensayo ASTM D-1586
c_2	Factor de corrección que considera el revestimiento en el ensayo ASTM D-1586
c_3	Factor de corrección que considera el diámetro de la perforación en el ensayo ASTM D-1586
<i>CCCR</i>	<i>Código de Cimentaciones de Costa Rica</i>
<i>CFIA</i>	<i>Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica</i>
<i>CSCR</i>	<i>Código Sísmico de Costa Rica</i>
<i>CGTLCR</i>	<i>Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica</i>
c_U	Cohesión en arcillas blandas
E_o	Módulo de elasticidad o módulo de Young
ER_{ap}	Energía realmente aplicada para utilizar en la corrección de N_{60} , en porcentaje
ER_{es}	Energía normalizada al 60% para ser utilizada en la corrección de N_{60} , en porcentaje
FS	Factor de seguridad
γ_d	Peso específico seco
γ_f	Peso específico húmedo
G_s	Gravedad específica
γ_s	Peso unitario de los sólidos
γ_{sat}	Peso unitario del suelo saturado
GSI	Índice geológico de resistencia
IP	Índice de plasticidad
γ_w	Peso unitario del agua
<i>LanammeUCR</i>	Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica
LL	Límite líquido
LP	Límite plástico
MEL	Método de equilibrio límite
MEF	Método de elementos finitos
MDF	Método de diferencias finitas
N_{60}	Número de golpes del ensayo ASTM D-1586 con corrección aplicada
N_{SPT}	Número de golpes en los tramos II y III del método de ensayo de penetración estándar ASTM D-1586
q_{adm}	Capacidad de soporte admisible del suelo
q_u	Resistencia a la compresión simple
q_{ult}	Resistencia última del suelo
R_0	Resistencia a la compresión uniaxial de las rocas
RMR	Clasificación del macizo rocoso (por sus siglas en inglés)
RN	Ruta nacional
RQD	Designación de la calidad de la roca (por sus siglas en inglés)
SPT	Prueba de penetración estándar
$SUCS$	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

$\tan \phi$	Tangente del ángulo de fricción interna del suelo o matriz rocosa
z_c	Profundidad de la grieta de tensión
σ	Tensión en el plano de rotura
τ	Resistencia al cortante del suelo
$V1$	Velocidad de la onda en el estrato 1 o superior, en la cual la onda sísmica viaja una distancia a un tiempo determinado para su aplicación en el ensayo de sísmica de refracción
$V2$	Velocidad de la onda en la estrato 2 o inferior, en la cual la onda viaja una distancia a un tiempo determinados para su aplicación en el ensayo de sísmica de refracción.

RESUMEN

A lo largo de la ruta nacional No. 856, la cual se divide en 5 secciones en su extensión de 154 km aproximadamente, se han realizado diversas intervenciones a los taludes en los últimos tres años. Esto ha provocado, en algunos sitios a lo largo de la ruta, el colapso de los taludes, lo cual afecta a los pueblos, perjudica la condición socioeconómica, impide el paso y favorece el transporte de sedimento al río San Juan, producto de las condiciones ambientales que deterioran paulatinamente la condición de estos taludes. Es por ello que el presente proyecto tiene como objetivo elaborar un análisis y diseño de soluciones ingenieriles a problemas de estabilidad de taludes en suelos y rocas blandas sobre la ruta nacional No. 856, que comprende desde los estudios de campo y de laboratorio para la caracterización del talud, hasta el modelado matemático y la calibración por medio del retrocálculo, que permitan el cálculo de la solución de estabilización, utilizando para ello el programa SLOPE/W® mediante el método de Morgenstern y Price. Esto permite evaluar las condiciones a las que están sometidos los taludes a causa de los trabajos que se han venido realizando, aportando un valioso conocimiento, tanto sobre las características físicas y mecánicas como de medidas de estabilización de los suelos y rocas blandas de la zona fronteriza norte, útil para aplicarlo en trabajos de estabilización que se pudieran llevar a cabo en la zona, lo que reduciría el colapso paulatino de los taludes y el arrastre de sedimentos, a causa de los cuales se han generado gastos innecesarios por parte de la Administración Pública, pues se han aplicado procedimientos de estabilidad que no han resultado ser adecuados. Adicionalmente, el conocimiento aportado en este estudio contribuirá de manera positiva a la mejora de las condiciones socioeconómicas de la zona fronteriza norte y sus alrededores, así como a la preservación del medio ambiente.

Palabras clave: calibración, estabilidad de laderas, modelado, Morgenstern-Price, retrocálculo, SLOPE/W®, taludes.

ABSTRACT

Along national route No. 856, which is approximately 154 km long and is divided into 5 sections, several interventions have been conducted on its slopes during the past three years. In some places along the route, this has caused slope failure, having an impact on people, transportation and socio-economic conditions in general, and also causing sediment transport to the San Juan River, as a result of the environmental degradation caused by landslides. Thus, this research project is aimed at analyzing and designing engineering solutions to slope instability problems in soils and soft rocks along route No. 856. The analysis includes field and laboratory studies in order to characterize the slopes, and mathematical modeling and calibration using back-analysis to calculate stabilization solutions with the software code SLOPE/W® using the Morgenstern-Price method. This allows evaluating the slope conditions resulting from the interventions, thus providing valuable knowledge about physical and mechanical properties as well as about stabilization measures for soils and soft rocks present in the north border area of the country. This work will be useful in stabilization and remedial works that are being carried out in the area, which would eventually reduce the gradual collapse of slope and subsequent sediment transport, and consequently reduce government expenses on inadequate solutions. Additionally, the results of this research project will have a positive impact on the improvement of the socioeconomic conditions and the protection and preservation of the environment in this northern part of the country.

Keywords: back-analysis, calibration, modeling, Morgenstern-Price, slopes, SLOPE/W®, slope stability

INTRODUCCIÓN

Los problemas de estabilidad de taludes en las carreteras de Costa Rica han tenido gran importancia debido a que muchos trabajos realizados, así como la influencia de las condiciones climáticas, favorecen fenómenos de inestabilidad de taludes y laderas. En consecuencia, se producen desprendimientos, deslizamientos y arrastres que generan el colapso de las carreteras, con sus consiguientes pérdidas humanas y económicas, y que obligan a realizar labores de reparación.

En este proyecto de investigación se desarrolla un análisis de la estabilidad de los taludes de suelos y rocas blandas en la RN No. 856, ubicada en la zona fronteriza con Nicaragua. Esta ruta se encuentra en grandes áreas montañosas, cuyas laderas han sido intervenidas sin estudios previos, realizándoles cortes y colocando rellenos inadecuados (Quesada & Ulate, 2012). La situación de los taludes ha impedido que la zona fronteriza sea adecuadamente vigilada por los comandos y las policías de frontera, asimismo el comercio, la salud y la economía de las personas que habitan en las cercanías de la zona se han visto afectados por la condición en la que se encuentran los taludes.

Tomando en cuenta lo antedicho, este proyecto tiene como objetivo general elaborar un análisis y diseño de soluciones ingenieriles para la estabilidad de taludes en suelos y rocas blandas en carreteras, a partir de la caracterización y el modelado matemático de tres taludes típicos dentro de la sección comprendida entre el río Pocosol y río Infiernito, sobre la RN No. 856. Esta ruta se caracteriza por la estabilidad de sus taludes, debido a que generalmente confluyen los elementos más importantes para la ocurrencia de deslizamientos, como son la topografía, la sismicidad, la meteorización y las lluvias intensas. Los taludes de esta ruta presentan fallas frecuentes debido a trabajos inadecuados en los mismos, los cuales no se ejecutaron con los estudios geotécnicos previos necesarios (Quesada & Ulate, 2012).

Por lo anterior y con el fin de que los trabajos en estabilidad de taludes, especialmente en suelos y rocas blandas, se realicen adecuadamente, se desarrolla este proyecto para que sea parte de la documentación de apoyo a los profesionales en el campo de la ingeniería y sea de utilidad en los temas relacionados con la estabilidad de taludes. Aunado a esto, este proyecto es de gran importancia ya que contribuye con la investigación de la zona fronteriza y atiende las solicitudes de diversas entidades, como el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR), el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) y el Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto, quienes en conjunto han participado activamente en el planteamiento de soluciones a los problemas de estabilidad de taludes a lo largo de la ruta.

El tema de la inestabilidad de los taludes se ha estudiado ampliamente en Costa Rica, en vista de la gran cantidad de problemas de estabilidad que ha tenido lugar en el territorio nacional, por ejemplo, los problemas presentes en las rutas nacionales No. 27, No. 32, No. 2, No. 606 y, en general, en diversas rutas a nivel nacional, han sido objeto de estudio por diferentes profesionales en el campo de la geotecnia.

Con este proyecto se realiza el estudio de algunos taludes de la RN No. 856, para ello se llevan a cabo estudios de campo y de laboratorio, con base en las normas ASTM, así como diferentes métodos y técnicas de investigación como la aplicación de ensayos geofísicos, la determinación de la clasificación geomecánica del macizo rocoso, el análisis con base en el modelo constitutivo Mohr-Coulomb, la aplicación de los criterios de Hoek y Brown y el análisis con el método del equilibrio límite en dos dimensiones para obtener el factor de seguridad, que se compara con factores recomendados por el *Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica* (2015).

Para realizar la modelación del problema se hace uso del programa SLOPE/W®, aplicando el método de Morgenstern y Price, y así determinar las soluciones de estabilización que se recomiendan en la zona.

Este documento se compone de cinco capítulos donde se describen los diversos aspectos teóricos y metodológicos que se tuvieron en cuenta para el desarrollo de la investigación, así como los principales resultados obtenidos.

En el capítulo 1 se esbozan las generalidades de la investigación, se realiza un análisis del estado actual del conocimiento sobre la temática objeto de estudio y se plantea el problema, los objetivos, el alcance y las limitaciones que se presentaron.

El capítulo 2 constituye el marco teórico, donde se hace un análisis de la bibliografía consultada sobre el tema y se analizan y evalúan los principales aportes teóricos y metodológicos sobre el tema.

En el capítulo 3 se detalla la metodología seguida en la investigación. Aquí se describe cada uno de los pasos que se siguieron para el logro de los objetivos. Los métodos, las técnicas y las estrategias de investigación utilizadas se reseñan en este capítulo. Se explican todos los ensayos realizados y la manera en que los resultados son procesados para llevarlos al modelado.

En el capítulo 4 se describen y analizan los resultados obtenidos en la investigación realizada, se presentan las tablas, los gráficos y demás información proveniente de los diferentes ensayos realizados. Todos los valores obtenidos se utilizan para generar el modelo, el cual se calibra hasta lograr la convergencia que define los parámetros de diseño para la solución del problema de la estabilidad, lo cual se presenta mediante perfiles geotécnicos como propuestas de solución.

Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO 1 . GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Antecedentes y justificación del estudio

A través de la historia, la estabilidad del suelo ha sido ampliamente analizada, desde la construcción de líneas férreas en el siglo XIX, donde el tema de la estabilidad de los taludes fue, no solo parte importante para prevenir los deslizamientos, sino que constituyó un punto de partida para la detección y evaluación de potenciales deslizamientos en el futuro. Por ello, desde 1910, se desarrollaron los métodos de las cuñas, el de las rebanadas y el principio de las presiones efectivas. En 1954, se inicia el desarrollo de los métodos modernos, como los de Bishop, Janbu, hasta llegar a nuestros días, con los métodos de elementos finitos, con el fin de realizar análisis cada vez más precisos de la estabilidad de los taludes.

La práctica común en ingeniería es definir la estabilidad de un talud en términos del factor de seguridad obtenido de un análisis geomecánico, es decir, la amenaza de que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña obteniendo los valores de resistencia al cortante en el momento de la falla de acuerdo, por ejemplo, con el método de equilibrio límite (Suárez, 1998). Aunado a ello, hay que tomar en cuenta que los cálculos de estabilidad de taludes son largos y tediosos y que en algunos casos es imposible realizar el cálculo sin el uso de una computadora. Algunos investigadores en Chile han empleado los métodos de Fellenius, Bishop simplificado y Janbu a través del uso del programa SLOPE/W®, con el fin de comparar diferentes resultados de factor de seguridad en condiciones estáticas y pseudoestáticas, resaltando la importancia de considerar el efecto del sismo en zonas de alta actividad sísmica (Sanhueza & Rodríguez, 2012).

En el caso del estudio de los suelos tropicales, algunos investigadores han trabajado por años solamente en el análisis de suelos residuales (Suarez, 1998). Desde el punto de vista de estabilidad, la frecuencia con que fallan los taludes se incrementa con el pasar de los años debido principalmente a la acción directa del hombre (Botero & Romo, 2006).

En Costa Rica, se pueden mencionar algunos casos donde se han presentado graves problemas en la estabilidad de los taludes, por ejemplo, el caso de la ruta No. 27 donde, recién inaugurada, se produjeron una serie de desprendimientos que ocasionaron el cierre de la vía, requiriéndose de un estudio solicitado por el Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica (CFIA) en coordinación con la Asociación Costarricense de Geotecnia (ACG) (ACG, 2010).

Igualmente, cabe mencionar los informes que elabora el LanammeUCR sobre inspecciones en los taludes de la RN No. 32 (Braulio Carrillo), donde constantemente se presentan desprendimientos y deslizamientos de material (ACG, 2010). Se destaca esta ruta debido a que, desde su apertura, presenta la problemática de constantes interrupciones del flujo vehicular debido a los deslizamientos de suelos de baja resistencia, fracturas y desplazamiento de rocas, pendientes y alturas elevadas, debilitamiento progresivo de los taludes, afloramiento de las aguas subterráneas y las aguas de lluvia sin controles de drenaje; provocando así daños y cierres temporales que afectan directa e indirectamente la economía nacional, en detrimento del progreso y el desarrollo de la nación (Ulloa & Vargas, 2007).

Otra vía del país que sufre problemas de estabilidad de taludes es la RN No. 2, que presenta un tramo de alta vulnerabilidad debido a la susceptibilidad al deslizamiento, con movimientos de alrededor de 60 m de altura y 140 m de extensión. El LanammeUCR en sus informes ha recomendado estudios geofísicos, geológicos y geotécnicos para la caracterización de los suelos y estabilidad de taludes.

Por otro lado, existen referencias de lugares donde se realizan cortes a los taludes sin previos estudios geotécnicos, como es el caso de la RN No. 606, sección Guacimal-Santa Elena, donde el LanammeUCR recomienda realizar estudios específicos en cada tramo de la ruta (LanammeUCR, 2013).

Mora (2014) identifica estudios con métodos determinísticos que involucran la confección de perfiles topográficos, exploración geotécnica de campo, ensayos de laboratorio, modelamiento geotécnico con

programas de cómputo y elaboración de propuestas para la remediación en Mansiones de Montes de Oca, la cárcel del Buen Pastor, urbanizaciones en Heredia; además, en los últimos años se ha incursionado en el estudio de la amenaza por caída de rocas mediante la simulación de trayectorias de bloques de roca inestables en San Gabriel de Aserrí y en Bebedero de Escazú.

Un caso particular donde se advirtió a las autoridades de tomar medidas en cuanto a la inminencia de un deslizamiento fue en Las Lagunas de Arancibia, donde luego de fuertes lluvias, se desencadenaron deslizamientos de gran magnitud y avalanchas de detritos, que cobraron la vida de personas y que acarrearón desalojos. Éste es un ejemplo que evidencia la magnitud de eventos a los cuales nuestro país se encuentra expuesto y las dificultades a las que se enfrentan las autoridades para manejar la prevención de desastres (Mora, 2006).

Importantes trabajos de investigación se han realizado en el cantón de Escazú, en zonas como Palo Campana, Salitrillos, Curio y las microcuencas de los ríos Agres y Guayabo, donde ha habido necesidad de estudiar los procesos de inestabilidad de laderas y de brindar recomendaciones, debido tanto a las fuertes precipitaciones que se han registrado, como al desarrollo que ha tenido la zona (Soto, Chaves, Durán & Herra, 2013).

Los eventos sísmicos han disparado extensos y severos deslizamientos, tal es el caso del terremoto de Limón en el año 1991, cuando se produjo desprendimiento y movilización de los horizontes del suelo residual y roca alterada. Esto ha constituido una importante base para establecer correlaciones que facilitan la comprensión del desarrollo de estos movimientos (Mora & Mora, 1994).

En el caso específico del suelo de la zona fronteriza norte de Costa Rica, se debe mencionar que se ha estudiado poco; además, se tiene el agravante de que, producto de las intervenciones desmedidas de maquinaria que se realizaron en la ruta fronteriza en el año 2011, gran cantidad de taludes a lo largo de la ruta ha estado colapsando paulatinamente.

En el marco del contexto antes mencionado, el objetivo de la presente investigación es elaborar un análisis y diseño de soluciones ingenieriles para la estabilidad de taludes en suelos y rocas blandas, a partir de la caracterización y modelado de tres taludes en la zona fronteriza, específicamente en la sección que va desde el río Pocosol hasta el río Infiernito. Este procedimiento incluye la caracterización del material para determinar sus propiedades físico-mecánicas en los taludes más críticos, con topografía y geología más compleja, para obtener el diseño definitivo utilizando herramientas de modelado matemático como el programa SLOPE/W® de GeoSlope International, Ltd., que aplica el método de Morgenstern y Price.

Los resultados de este estudio y su posterior implementación repercutirán favorablemente en las comunidades aledañas, en el comercio, la salud y la educación, ya que el estado en que se encuentra la ruta, con grandes deslizamientos a lo largo de los años en que ha estado intervenida, ha provocado, no sólo el impedimento del paso, sino también la contaminación del río San Juan. Además, servirá como herramienta para labores que se ejecuten en el futuro tomando en cuenta las características presentes, dado que las soluciones que se han puesto en práctica no han sido las mejores ya que los taludes continúan fallando. Adicionalmente, con el presente estudio se alcanzan resultados que permitirán a los ingenieros tomar decisiones más racionales, económicas y seguras en el estudio de los taludes en suelos y rocas blandas mediante la interpretación integrada de los resultados de la aplicación de los métodos y ensayos de laboratorio que permitan una evaluación cualitativa y cuantitativa del comportamiento real.

1.2. Planteamiento del problema

Costa Rica es un país con gran cantidad de montañas, caminos rurales, con economía limitada y dependiente de las importaciones y exportaciones del mercado internacional, por lo que es de gran importancia mantener en buen estado la red de carreteras. En este caso, se trata del problema de estabilidad de los taludes en la frontera con Nicaragua, en la RN No. 856, específicamente en la sección 2, río Pocosol-río Infiernito, donde se localiza el sector montañoso de la ruta. Se trata de un sector muy susceptible a sufrir problemas de

deslizamientos de suelo debido a que, según Suárez (1998), en los suelos tropicales generalmente se reúnen cuatro de los elementos determinantes para su ocurrencia: topografía, sismicidad, meteorización y lluvias intensas.

Se tiene claro que, para la construcción de las vías, se realizan cortes y rellenos significativos que están expuestos a condiciones de saturación por las aguas de lluvia, además de que ocurren movimientos sísmicos que influyen directamente en la estabilidad de los taludes.

En el año 2011 se intervino la zona para abrir una trocha fronteriza, como una ruta importante por diferentes factores, entre ellos, buscar una alternativa debido al litigio con Nicaragua ante la Corte Internacional de Justicia con respecto a los derechos de navegación del río San Juan, facilitar a la policía mejores controles fronterizos, permitir el acceso a la ruta, mejorar la comunicación de los habitantes de la zona, facilitar la instalación de servicios públicos como la electrificación, generar oportunidades de empleo, facilitar la atención de emergencias y acceso a la educación. Lamentablemente, todo se desarrolló sin realizar estudios adecuados y se hicieron los trabajos de corte y relleno de una manera totalmente errónea.

En consecuencia, los trabajos inadecuadamente realizados, la carencia de mantenimiento y tratamiento de los taludes, los estudios incompletos, el uso de maquinaria inapropiada, la conformación de pendientes inadecuadas y la falta de drenajes produjeron la falla constante de los taludes, tanto de corte como de relleno. Esta situación no solo ha afectado la zona desde el punto de vista económico y social, sino que también ecológico, ya que ha provocado el arrastre de sedimento hacia el cauce del río San Juan. Todo esto evidencia que en Costa Rica se realizan obras importantes y se deja de lado el estudio geotécnico al no realizar estudios de suelo adecuados, lo cual afecta la estabilidad de los taludes (Quesada & Ulate, 2012).

Sobre la ruta en estudio se han realizado trabajos posteriores para recuperar la estabilidad de los taludes, por ejemplo, se han hecho bermas, se ha colocado fibras naturales para evitar la erosión, se ha implementado la hidrosiembra, se han realizado taludes muy empinados con pendientes que producen inestabilidad debido a los materiales predominantes de la zona y se han construido cunetas revestidas con ausencia de sus respectivas contracunetas, con el agravante de que en la estación lluviosa posterior muchos de esos trabajos fallaron, de manera que continúan los deslizamientos, las cárcavas, etc. El Estado ha invertido gran cantidad de recursos sin obtener los resultados esperados, lo que influye negativamente en el desarrollo del país, si se tiene en cuenta el gasto de cuantiosos recursos materiales y económicos.

Por todo ello, se hace necesario implementar un procedimiento para el análisis y diseño de estabilidad de taludes en la zona fronteriza norte, que sea de utilidad tanto para el desarrollo de trabajos de ingeniería en esta zona en particular, como para su desarrollo en zonas similares del país.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la estabilidad de taludes en suelos y rocas blandas a partir de la caracterización y el modelado matemático de tres taludes típicos dentro de la sección Pocosal – Infiernito, sobre la RN No. 856.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Analizar el estado actual del conocimiento sobre los problemas de estabilidad de taludes, las metodologías utilizadas y el empleo de técnicas de modelado en el diseño de las soluciones de estabilización.
2. Caracterizar geotécnicamente los taludes objeto de estudio, ubicados en la sección río Pocosal – río Infiernito, sobre la RN No. 856.
3. Analizar y diseñar las soluciones para la estabilización de taludes mediante el modelado, utilizando como herramienta el programa SLOPE/W® con el método de Morgenstern y Price.

4. Brindar recomendaciones de estabilización, control de drenaje y control de erosión para cada una de las soluciones propuestas.
5. Proponer, a partir del estudio de casos, un grupo de recomendaciones metodológicas generales para el análisis de la estabilidad de suelos y rocas blandas.

1.4. Alcance y limitaciones

1.4.1. Alcance

Entre los alcances de este proyecto se mencionan los siguientes:

- Inspección de la sección Pocosol-Infiernito de la RN No. 856 para realizar fichas de descripción rápida de los taludes existentes, que incluyen aspectos geométricos, geológicos, geomorfológicos, hidrológicos y fotográficos de los taludes en estudio.
- Tipificación de los cortes geotécnicos típicos de los taludes presentes en el trazado para su estudio detallado, a partir de la caracterización de los taludes.
- Realización de un levantamiento topográfico general de cada uno de los taludes objeto de estudio.
- Realización de estudios geofísicos y de caracterización del macizo rocoso.
- Realización de estudios de perforación, muestreo y laboratorio para determinar los parámetros físico-mecánicos característicos de las diferentes capas geotécnicas presentes en los cortes.
- Modelado de los taludes objeto de estudio con el programa SLOPE/W®, a partir de la caracterización efectuada y la calibración del modelo físico mediante las observaciones efectuadas *in situ*.
- Propuesta de recomendaciones generales de investigación y diseño para la estabilidad de los taludes en carreteras en suelos y rocas blandas.

1.4.2. Limitaciones

Las limitaciones que se tienen para el cumplimiento de los objetivos son las siguientes:

- No se pudo realizar una mayor cantidad de ensayos geotécnicos de corte, debido a sus altos costos y a la disponibilidad de tiempo.
- No se pudo realizar ensayos adicionales o aplicar métodos alternos de investigación, como el uso de inclinómetros para el monitoreo, ensayo triaxial, implementación de programas computacionales más rigurosos, imágenes infrarrojas aéreas o tecnología LiDAR.
- Las condiciones climatológicas impidieron realizar algunos ensayos programados.
- No se pudo realizar los estudios geotécnicos de comprobación, ni se realizó el monitoreo posterior al análisis para comprobar, con el paso del tiempo, el comportamiento de los taludes y compararlo con los cálculos realizados.
- Algunos de los ensayos de campo y de laboratorio no fueron realizados por el investigador.

Conclusiones parciales

Se ha evidenciado, a través de la revisión bibliográfica, la existencia de la problemática a nivel nacional e internacional en cuanto a la inestabilidad de taludes y la importancia que han tenido los aportes tecnológicos a lo largo de la historia para dar solución a la inestabilidad de taludes y laderas.

En la ruta No. 856 se han realizado múltiples trabajos inadecuados para solucionar los problemas de inestabilidad sin la ejecución de los análisis correspondientes, lo cual ha provocado que el Estado haya tenido que invertir grandes sumas de dinero en aras de solucionar los problemas ocasionados.

CAPÍTULO 2 . MARCO TEÓRICO

2.1. Nomenclatura de un talud o ladera

Los taludes o laderas son masas de tierra que no son planas, sino que presentan pendiente o bien cambios importantes en la altura. Cuando se habla de “ladera”, se hace referencia a los terrenos cuya conformación actual tuvo origen mediante un proceso natural, mientras que el término “talud” se refiere a la conformación artificial producida por el hombre.

Las laderas que han permanecido estables por muchos años pueden fallar en forma imprevista debido a cambios topográficos, sismicidad, flujos de agua subterránea, cambios en la resistencia del suelo, meteorización o factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad (Sánchez, 2009).

La nomenclatura básica recomendada para el estudio de la estabilidad de los taludes es la que se basa en los sistemas de clasificación propuestos por Hutchinson (1968) y Varnes (1958 y 1978). Este último fue actualizado por el Transportation Research Board de los Estados Unidos (1996), que se muestra en la figura 2.1 y cuyo sistema es el más utilizado en todo el mundo (Suárez, 2009).

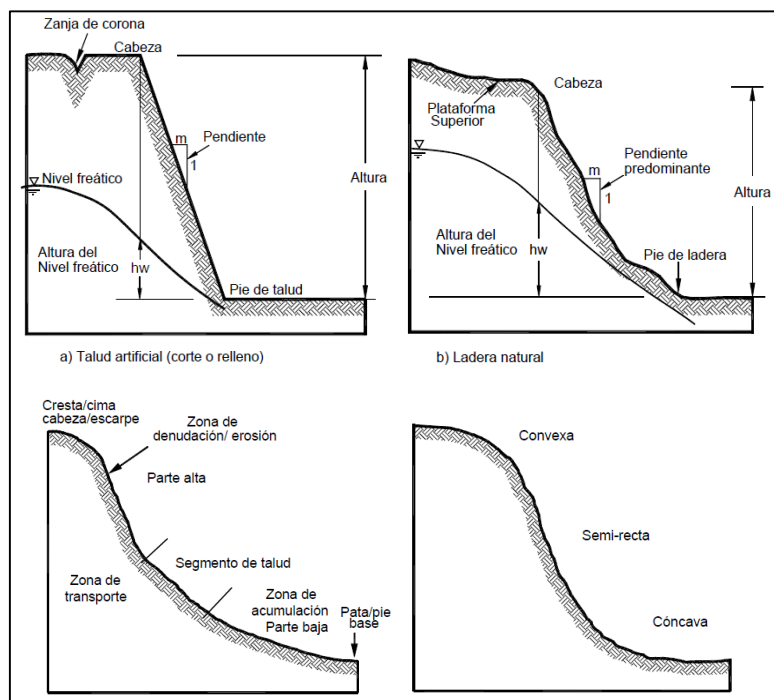


Figura 2.1. Nomenclatura y partes generales de los taludes y laderas.

Fuente: Suárez (2009)

La clasificación de los movimientos de los taludes y laderas basado en el sistema de Varnes (1978) considera dos aspectos: descripción del tipo de material y tipo de movimiento. El sistema de clasificación de Varnes resulta adecuado para dar cumplimiento a los objetivos de la presente investigación, por lo que se toma como base para la elaboración de los instrumentos de inspección de los taludes y laderas, así como para la clasificación de los movimientos de masa.

El talud se compone de una parte alta convexa con una cabeza, cima, cresta o escarpe, sitio donde se presentan los procesos de erosión. Otro componente de los taludes es la parte intermedia semirrecta y una parte baja cóncava con un pie o base, donde se presentan los procesos de deposición. De modo que en un talud o ladera se encuentran los siguientes elementos:

- Pie: cambio brusco de la pendiente en la parte inferior del talud o ladera. En una ladera generalmente esta parte es cóncava.
- Cabeza, cresta, escarpe: cambio brusco de la pendiente en la parte superior del talud o ladera. Cuando se presentan en el suelo pendientes semi-verticales, se denomina escarpe, su forma generalmente es convexa.
- Altura: distancia vertical entre el pie y la cabeza. En los taludes artificiales y en las laderas esta distancia es fácil de determinar, a pesar de que la topografía del suelo puede dificultar su medición, existen instrumentos adecuados para su medición como lo es el GPS o drones.
- Altura del nivel freático: distancia que hay desde el pie del talud o ladera hasta el nivel del agua. Esta distancia se mide debajo de la cabeza del talud.
- Pendiente: Medida de la inclinación de la superficie del talud o ladera. Puede ser en grados, en tanto por ciento o en la relación H:1, donde H es la distancia horizontal. Los suelos o rocas de mayor resistencia pueden tener pendientes mayores en las laderas, mientras que los materiales blandos generan pendientes bajas.

Otros elementos importantes que se pueden considerar son la longitud, convexidad (vertical), curvatura (horizontal) y área de la cuenca de drenaje, ya que estos pueden influir significativamente en el comportamiento del talud.

2.2. Movimiento de los taludes y laderas

Por la acción de la fuerza de gravedad, en los taludes y laderas existe empuje constante sobre los materiales hacia las partes inferiores. El término más comúnmente utilizado para denominar los movimientos de los taludes es “deslizamiento de tierra”, el cual hace referencia al movimiento de suelos, rocas blandas, rellenos artificiales o combinaciones de los mismos. Según Alcántara (2000), ha existido confusión en el correcto uso de los procesos de remoción en masa, para lo cual, a partir de la clasificación de Varnes (1978) y Hutchinson (1988), los diferentes movimientos de los suelos se subdividen de acuerdo con los materiales formadores. La etapa de reconocimiento y clasificación del tipo de movimiento es de suma importancia ya que puede condicionar el análisis de estabilización del mismo (IGME, 1986).

De acuerdo con los trabajos realizados por Suárez (1998) sobre los suelos tropicales, se puede decir que en Costa Rica, al estar ubicada en una zona tropical, predominan los suelos residuales, los llamados “suelos rojos tropicales”, debido al contenido de hierro y a la tendencia de su coloración roja producto de procesos de meteorización. La estabilidad de taludes es particularmente complicada en un medio tropical debido a que la mayoría de los suelos son residuales, el régimen hidrológico es complejo, la humedad ambiental y la temperatura son muy altas, la geología compleja, la topografía es escarpada y los demás factores ambientales son generalmente desfavorables.

Concepto de superficie de falla

El término “superficie de falla” se utiliza para referirse a una superficie asumida, a lo largo de la cual puede ocurrir el movimiento o la rotura del talud, como se muestra en la figura 2.2. Esta rotura no ocurre a lo largo de esas superficies si el talud está diseñado adecuadamente. En los métodos de equilibrio límite (MEL), el factor de seguridad se asume que es igual para todos los puntos a lo largo de la superficie de falla; por lo tanto, este valor representa un promedio del valor total en toda la superficie. Si la falla ocurre, los esfuerzos de cortante serían iguales en todos los puntos a todo lo largo de la superficie de falla.

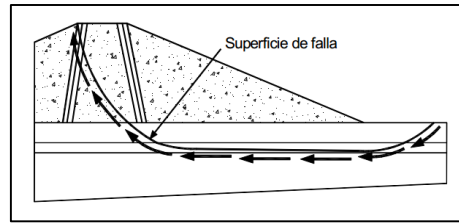


Figura 2.2. Superficie de falla
Fuente: Suárez (2009)

Los movimientos en los taludes generalmente se presentan sobre la superficie de falla por caída libre, inclinación o volcamiento, reptación, hundimiento, flujos, avalanchas, lahares y deslizamientos, los cuales, producen los fenómenos de inestabilidad. La erosión se produce en las capas más superficiales y las denudaciones afectan a las partes más profundas.

2.2.1. Clasificación de los movimientos de masa

En los trabajos de Suárez (2009), se retoma la clasificación de los movimientos realizada por Varnes y actualizada posteriormente por la Transportation Research Board de los Estados Unidos (1996); según la cual, los principales tipos de movimiento son los siguientes:

- **Caído:** Es el desprendimiento y caída de materiales del talud, que pueden ser de cualquier tamaño, desde suelo hasta bloques, y se produce en caída libre. Los caídos de suelo se producen en taludes de gran pendiente y ocurren sin evidencias previas de movimiento.
- **Inclinación o volcamiento:** Consiste en una rotación hacia adelante de unidades de material térreo con centro de giro por debajo del centro de gravedad de la unidad. Generalmente, los volcamientos ocurren en las formaciones rocosas, pero se pueden presentar en suelos cohesivos secos y en suelos residuales. Existen diversos modos de volcamiento como el volcamiento a flexión, el volcamiento en V invertida y el volcamiento a flexión en bloque.
- **Reptación (*Creep*):** Es el movimiento del suelo extremadamente lento sin una superficie definida de falla. Su desplazamiento puede ser del orden de centímetros por año y puede afectar grandes áreas de suelo. Tiene lugar generalmente en pendientes bajas y, en suelos arcillosos, se produce con más frecuencia debido a las condiciones de secado y humedecimiento.
- **Hundimiento:** Es un movimiento vertical de masas de suelo, puede ser de gran magnitud o pequeño. Existen hundimientos por deformación geológica (*sagging*), que son deformaciones profundas causadas por la acción de la gravedad; también existen hundimientos por subsidencia (formación de cavernas y *sinkholes*), que pueden suceder producto de meteorización química, donde el techo de las cavernas colapsa y se produce el hundimiento.
- **Flujo:** Es el movimiento de partículas o bloques pequeños dentro de una masa que se mueve sobre una superficie, el movimiento es similar al de un líquido viscoso. Este flujo puede ser laminar o turbulento. Los flujos son influenciados por las lluvias, los sismos, la alteración de suelos sensitivos, como los sedimentos no consolidados o bien deslizamientos en zonas de alta pendiente. Existen varios tipos de flujo de acuerdo con el material deslizado: flujo de bloques de roca, compuesto por cantos de roca; flujo de residuos o detritos, los cuales son movimientos extremadamente rápidos compuestos de material grueso con menos del 50% de materiales finos, contienen árboles, escombros, materia vegetal, así como objetos arrastrados; flujo de suelo o tierra con más del 50% de finos, de consistencia líquida, pueden ser rápidos o lentos; y los flujos de lodo, que son suelos suspendidos en agua que alcanzan velocidades muy altas con gran fuerza destructiva.

- **Avalancha:** Se clasifican dentro de este tipo de movimiento aquellos flujos que alcanzan grandes velocidades, de hasta 50 m/s, son los llamados “ríos de roca”, o bien como “flujo turbulento de granos”. Son típicos de zonas de alta montaña y con ausencia de vegetación.
- **Lahar:** Es un tipo especial de avalancha o flujo de detritos que tienen lugar debido a acciones de deshielo y erupciones volcánicas.
- **Deslizamiento (traslacional y rotacional):** Es un desplazamiento de corte a lo largo de varias superficies, se puede detectar fácilmente y puede ser de una sola masa o varias masas. Un deslizamiento se conforma de las siguientes partes, las cuales se muestran en la figura 2.3:
 - **Cabeza:** Parte superior de la masa que se mueve, no necesariamente es la cabeza del talud.
 - **Cima:** Punto más alto de la cabeza.
 - **Corona:** Material que se encuentra en el sitio, inalterado, adyacente a la capa más alta del escarpe principal.
 - **Escarpe principal:** Superficie inclinada a lo largo de la periferia posterior del sector en movimiento. La superficie de falla es la continuación de la superficie del escarpe dentro del material.
 - **Escarpe secundario:** Superficie inclinada producida por el desplazamiento diferencial dentro de la masa en movimiento. Se pueden presentar varios escarpes secundarios.
 - **Superficie de falla:** Área que se encuentra por debajo de movimiento y delimita el volumen del material desplazado. El suelo que está por debajo de esta superficie no se mueve. Puede suceder que en algún movimiento no se presente superficie de falla.
 - **Pie de la superficie de falla:** Línea de interceptación entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.
 - **Base:** Área cubierta por el material perturbado bajo el pie de la superficie de falla.
 - **Punta o uña:** Punto de la base que se encuentra a la mayor distancia respecto de la cima.
 - **Cuerpo principal del deslizamiento:** Material desplazado encima de la superficie de falla.
 - **Superficie original del terreno:** Superficie que existió antes de que se presentaran los movimientos.
 - **Costado o flanco:** Lado del movimiento; se debe hacer la diferencia entre el flanco derecho y el flanco izquierdo.
 - **Derecha e izquierda:** A la hora de describir un deslizamiento se recomienda utilizar ubicación geográfica por medio de los puntos cardinales, pero si se utilizan las palabras “izquierda” y “derecha”, debe tomarse como referencia el punto observando desde encima de la corona hacia el pie.

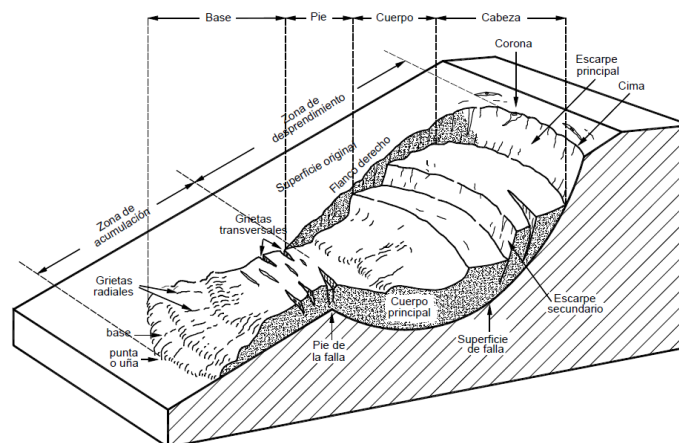


Figura 2.3. Nomenclatura de las partes de un deslizamiento
Fuente: Suárez (2009)

En un deslizamiento rotacional, la superficie de falla es cóncava hacia arriba y de manera rotacional respecto al eje transversal al deslizamiento, el centro de giro está encima del centro de gravedad. En las zonas tropicales, como en Costa Rica, la superficie de falla es curva en forma de cuchara. Los casos más conocidos de este tipo de movimiento se presentan en los suelos arcillosos blandos y en suelos residuales con perfiles meteorizados de gran espesor.

En el deslizamiento de traslación, la masa se desliza hacia afuera o hacia abajo, a lo largo de una superficie plana o ligeramente ondulada y no presenta rotación.

Como se muestra en la figura 2.4, con los datos de D (máxima profundidad de la superficie de falla con respecto a la superficie original del terreno medida perpendicularmente) y L (distancia desde el pie de la falla a la corona), en los movimiento de rotación la relación D/L es mayor que 0,15, mientras que en los de traslación la relación D/L es menor que 0,10. En un movimiento de rotación, la masa trata de auto-estabilizarse, mientras que en uno de traslación, puede progresar indefinidamente a lo largo de la ladera hacia abajo. Es importante tener en cuenta que la manera de tratar este tipo de movimiento de suelo depende de si es de rotación o de traslación porque algunos sistemas de estabilización no son eficaces en ambos.

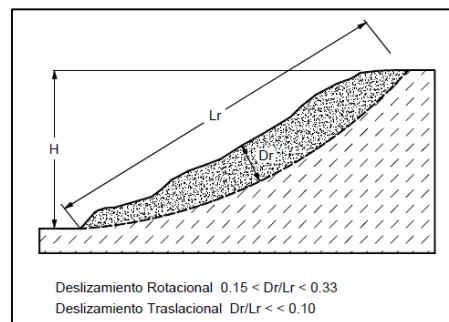


Figura 2.4. Relación D/L en deslizamientos
 Fuente: Suárez (2009)

Los deslizamientos estrictamente rotacionales (círculos de falla) son los más estudiados en la literatura. Este tipo de falla es típico de suelos tropicales, en suelos y rocas blandas, suelos cohesivos donde la superficie de falla generalmente es una curva semejante a un círculo. En la figura 2.5 se muestran ejemplos de deslizamientos rotacionales en los cuales se puede apreciar que la superficie original del terreno gira en la dirección de la corona del talud facilitándose su ocurrencia por la formación de escarpes semiverticales.

Los deslizamientos de traslación son controlados por superficies débiles como fallas, juntas, fracturas, planos de estratificación. Este tipo de movimiento está asociado con los tipos de falla plana y de cuña que suceden a lo largo de dos discontinuidades típicas de taludes en roca. En la figura 2.6 se muestran ejemplos de deslizamientos traslacionales, entre los cuales se encuentran los bloques deslizantes sobre discontinuidades sencillas de roca, deslizamientos en cuña o la falla de escalera, a lo largo de varios niveles de una familia de discontinuidades.

En la zona fronteriza norte de Costa Rica, sobre la RN No. 856 donde se han realizado trabajos de mitigación, en la mayoría de los taludes predominan las fallas de rotación, pero se presentan fallas de traslación en algunos casos. En las figuras 2.7 y 2.8 se muestran ejemplos de fallas, tanto de rotación como de traslación, sobre la ruta en estudio.

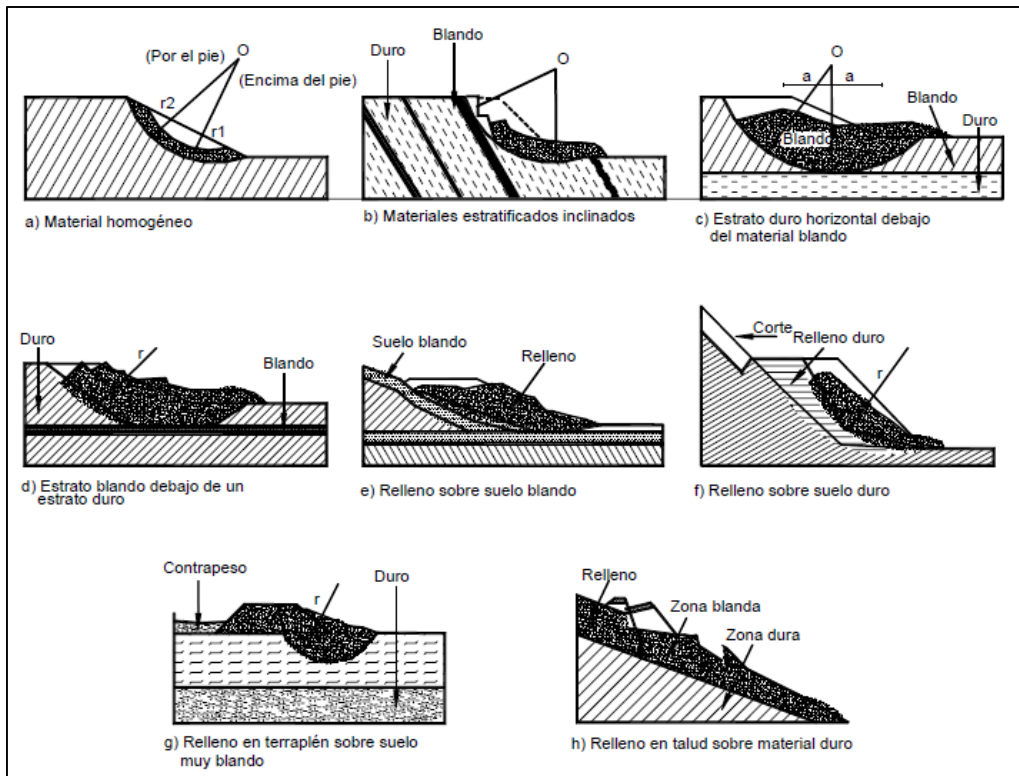


Figura 2.5. Desplazamientos de rotación

Fuente: Suárez (2009)

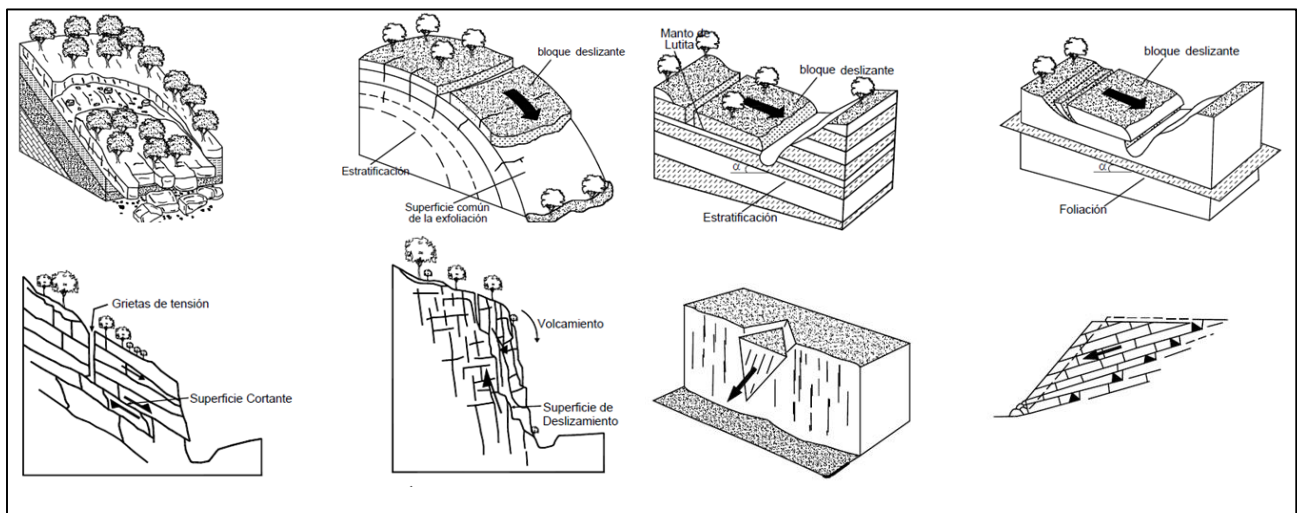


Figura 2.6. Ejemplos de deslizamiento de traslación

Fuente: Suárez (2009)



Figura 2.7. Ejemplos de fallas de rotación en la RN No. 856
Fuente: El autor



Figura 2.8. Ejemplo de deslizamiento de traslación en RN No. 856
Fuente: El autor

Algunos ejemplos de deslizamientos rotacionales y traslacionales en otras zonas de Costa Rica se muestran en las figuras de la 2.9 a la 2.14.



Figura 2.9. Los Chorros de Barú, Pérez Zeledón
Fuente: www.perezzeledon.net



Figura 2.10. San Rafael Debajo de Desamparados
Fuente: Bonilla et al. (2006)



Figura 2.11. San Ignacio de Acosta
Fuente: Madrigal (2011)



Figura 2.12. Ruta No. 1 Naranjo-Palmares
Fuente: Carrfon (s.f.)



Figura 2.13. Ruta No. 27, kilómetro 45
Fuente: Oviedo (2015)



Figura 2.14. Ruta No. 32, kilómetro 29
Fuente: www.teletica.com

En la presente investigación, el estudio se centra en el análisis de un tipo particular de movimiento de masa: los deslizamientos, principalmente del tipo rotacional debido que son movimientos repentinos, ocurren rápidamente, pueden involucrar volúmenes importantes de material con la consecuente pérdida de vidas humanas y materiales y se presentan con mayor frecuencia en la Ruta No. 856; aunque también son valorados otros tipos de movimientos presentes en la zona fronteriza norte como los deslizamientos traslacionales o reptación.

2.3. Aspectos generales sobre la inestabilidad de taludes y laderas

La actividad producida por el hombre sobre el medio natural ha generado gran deterioro ambiental, el cual se debe reparar mediante los correspondientes planes de recuperación de las zonas afectadas, donde se realicen las labores preventivas y correctivas necesarias para mantener la calidad ambiental afectada, tanto en las fases de construcción de carreteras como de explotación (Castro, 2000).

La ejecución de desmontes y terraplenes provoca fuertes alteraciones del relieve, con la creación de taludes que antes no existían y que exponen grandes superficies, susceptibles a degradarse y desestabilizarse por la acción de los agentes meteorológicos (Castro, 2000).

Existen diversos factores que influyen en la estabilidad de los taludes, entre los cuales se pueden mencionar los aspectos topográficos o climáticos. Hay dos factores que por su influencia destacan sobre todos los demás: la existencia de agua, de hecho, es en época de lluvias cuando se da un mayor número de fenómenos de inestabilidad y el otro factor importante es la acción del hombre (obras lineales, excavaciones en edificaciones), que puede dar lugar repentinamente a taludes inestables.

En general, existen varios factores que influyen en la estabilidad de las laderas naturales. Cuanalo, Oliva & Gallardo (2011) los dividen en dos grandes grupos: condicionantes y desencadenantes, como se aprecia en el cuadro 2.1. Los primeros dependen de las características intrínsecas de las laderas y los segundos son conocidos también como factores externos, causados por las condiciones climáticas regionales, por los eventos extremos y por el grado de impacto o deterioro ocasionado por las actividades del hombre.

Por lo tanto, se hace importante tomar diferentes medidas de estabilización superficial y de control de la erosión donde se vea reducida la degradación, fundamentalmente cuando los terrenos excavados son suelo o rocas blandas, como sucede en la RN No. 856.

Problemas importantes frecuentes en la zona de estudio son las inestabilidades superficiales y procesos erosivos acelerados, así como inestabilidades que pueden movilizar grandes cantidades de terreno.

Cuadro 2.1. Factores que influyen en la estabilidad de las laderas naturales.

AGENTES	DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS
Condicionantes (dependen de las características de la ladera)	Morfología y topografía	El relieve influye en la estabilidad, a mayor pendiente y altura, aumenta el efecto gravitacional
	Geología y características de los suelos superficiales	El tipo de roca, grado de alteración y meteorización, presencia de discontinuidades (grietas, fracturas, fallas), planos estratigráficos, porosidad, permeabilidad, propiedades físicas y mecánicas (resistencia y deformación), y estado de esfuerzos.
	Condiciones hidrogeológicas	El agua en el interior del terreno disminuye la resistencia cortante al aumentar la presión intersticial; además, incrementa el peso volumétrico del terreno con el consiguiente aumento en los esfuerzos actuantes.
	Vegetación	Las raíces fijan los suelos superficiales a los estratos de roca más resistentes ubicados a mayor profundidad, absorben el agua contenida en el suelo y atenúan la erosión superficial al mitigar el impacto de las gotas de lluvia y reducir la velocidad de escurrimiento
Desencadenantes (factores externos)	Lluvias	Su efecto depende de la intensidad, duración y distribución de la lluvia; puede ocasionar disolución de cementantes y rotura de capilaridad; además, influye directamente en factores condicionantes, como la meteorización y el nivel de agua subterránea.
	Terremotos	Las vibraciones sísmicas originan fluctuaciones en el estado de esfuerzos en el interior del terreno y pueden originar todo tipo de movimientos (caídos, deslizamientos, flujos, avalanchas, etcétera), dependiendo, además, de la magnitud del sismo y la distancia al epicentro.
	Vulcanismo	Las erupciones volcánicas pueden originar deslizamientos o avalanchas de derrubios de gran magnitud y velocidad en las laderas de los conos volcánicos; además de que el deshielo de las partes altas puede originar flujos rápidos.
	Congelación y deshielo	Factores climáticos que afectan principalmente regiones frías; este fenómeno produce expansiones, contracciones e infiltración de agua en fisuras y grietas.
	Erosión y socavación	Incluye la acción erosiva de ríos y oleaje, produciendo los siguientes efectos: - Socavación del material en el pie de la ladera que modifica el estado tensional y aumenta las fuerzas cortantes actuantes. - El deslizamiento puede embalsar un río y después romper súbitamente.
	Actividad humana	Influye en la estabilidad al cambiar la geometría de la ladera por excavaciones, construcción de caminos y presas, sobrecargas debido a estructuras, terraplenes o rellenos, voladuras, etc.; además, estas obras en general cambian las condiciones hidrogeológicas al alterar el drenaje superficial afectando el nivel freático y el flujo natural de escurrimiento. También se incluye la deforestación como una de las actividades humanas que más influencia negativa tiene en la estabilidad de una ladera.

Fuente: Cuanalo, Oliva & Gallardo (2011)

Los factores condicionantes y desencadenantes que se mencionan en el cuadro 2.1 son de vital importancia para considerarlos en las etapas iniciales de la investigación, cuando se elaboran las fichas de descripción rápida de los taludes y laderas, así como de los procesos de inestabilidad que se están desarrollando. Estos son elementos esenciales que ayudan a establecer los esquemas y modelos de cálculo.

Independientemente de los factores que se mencionan en el cuadro 2.1, existen elementos importantes que están implícitos en la descripción de dicho cuadro, los cuales se consideran importantes para resaltar, como causantes de la inestabilidad de los taludes. Además, de ellos depende cuáles métodos y técnicas se deben utilizar para la estabilidad de taludes, de acuerdo con Castro, (2000):

- Propiedades resistentes y de deformación de los suelos y las rocas:

La capacidad resistente de un suelo depende del grado de consolidación del material, de los parámetros resistentes del mismo (c , ϕ), del régimen de saturación y de la velocidad de aplicación de la carga.

- Características físicas y geométricas de las discontinuidades:

En los macizos rocosos diaclasados el comportamiento resistente y deformacional está controlado por las propiedades de las discontinuidades, por lo que la caracterización física y geométrica es fundamental.

- Estado tensional:

La determinación de las tensiones existentes es importante antes de efectuar la excavación de un terreno, así como el cambio tensional originado por dichos trabajos, ya que afectan notablemente la estabilidad de los mismos.

- Agua subterránea:

El agua constituye uno de los principales elementos a considerar a la hora de estabilizar un talud. Un estudio hidrogeológico revelará cuál es la circulación del agua en el macizo, ayudando a establecer cuál será la adecuada red de drenaje subterráneo.

- Variables geométricas del talud:

La geometría del talud, altura y ángulo no sólo condicionan la estabilidad global o local del conjunto, sino también aspectos constructivos y de ejecución de los diferentes taludes.

- Técnicas de excavación o construcción:

Las técnicas de construcción se basan en metodologías muy diferentes y se utiliza maquinaria muy variada. Cuando se utiliza de forma inadecuada, pueden producir resultados negativos sobre las propiedades resistentes de los materiales. Esto conducirá a tomar medidas correctivas de control y estabilización con un costo superior al inicial.

- Evolución temporal y meteorización:

El tiempo es un factor importante para considerar en la posible inestabilidad del talud. Se pueden presentar diferentes tipos de rotura en el tiempo, como son la rotura progresiva y la rotura retardada.

La rotura progresiva se refiere al movimiento no uniforme de la resistencia al corte a lo largo de la superficie de falla, mientras que la rotura retardada abarca todos los procesos que contribuyen a reducir los parámetros resistentes a lo largo del tiempo. Por ejemplo, si desaparece la capa vegetal, se acelera el proceso de erosión y da lugar a la inestabilidad, se conduce a incrementos de esfuerzos cortantes y se reduce la resistencia con el tiempo.

Se hace referencia, entonces, a procesos tales como cambios de temperatura o ciclos de humedad-deseccación como procesos de meteorización influyentes sobre los parámetros resistentes.

- Técnicas de refuerzo y sistema de drenaje:

Es importante que los análisis de estabilidad evalúen los efectos de los sistemas instalados y de su comportamiento a lo largo del tiempo. Es fundamental considerar el efecto del agua y controlarlo con adecuados sistemas de drenaje.

En el contexto de Costa Rica los factores antes mencionados revisten especial importancia, dado que existen taludes muy empinados, aunado a la condición de lluvias intensas predominantes en especial en la zona norte en estudio, así como a la actividad sísmica típica de nuestro medio.

Lo tradicional en Costa Rica es que a la mayoría de los taludes se les dé un tratamiento de tipo geométrico; aunque si bien es cierto que existen soluciones a los problemas de drenaje, no se da el mantenimiento o tratamiento adecuado, lo que provoca obstrucción y, como consecuencia, la falla del talud. Ante la situación de que los taludes de corte y relleno lleguen a presentar este tipo de problemas, se opta por soluciones de contención, por ejemplo, muros de retención en gaviones, suelo cocido, sistemas de tierra armada o bien, la utilización de geosintéticos. La tendencia que se ha observado a lo largo de los años con respecto al uso de las estructuras de contención mencionadas, es que generalmente se incorporan una vez que se presenta la falla, utilizándolos como medida de rehabilitación o atenuación del problema. De las soluciones de contención mencionadas, la que se utiliza con mayor frecuencia es el muro de retención en gaviones, que, a pesar de que es una solución de menor costo, no siempre resulta ser la más eficiente. En las figuras de la 2.7 a la 2.14 se observa el caso de taludes que llegan a la falla y, posteriormente, se realiza la intervención para su rehabilitación.

Además, cabe mencionar, que se utilizan inadecuadamente los sistemas de protección de erosión, como las fibras naturales y la aplicación de hidrosiembra, por ejemplo, en sitios donde siempre hay sombra o taludes con pendientes muy altas, de modo que el sistema no funciona.

En el *Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica* (2015) se tratan temas de la evaluación preliminar de los taludes, investigaciones geotécnicas y análisis de taludes y laderas, los cuales se refieren a diferentes tipos de fallas que no se apegan a alguna clasificación específica ni justifica criterios del porqué se incluyen específicamente algunos tipos de procesos inestables.

Previo a la publicación del *Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica* (2015), no existía una metodología sistemática ni normativa específica para la regulación del análisis de estabilidad de taludes en materia de obras de infraestructura vial, lo que se tenía era el *Código de Cimentaciones de Costa Rica* (CCCR), a pesar de que se estima que prácticamente el 50% o más del sistema vial nacional se encuentra directa o indirectamente afectado por corte o relleno de taludes de cierta importancia (Alpízar, 2012).

2.4. Reconocimientos generales de zonas inestables

La investigación de los movimientos de masa de una ladera o talud consiste en obtener toda la información posible sobre las características topográficas, geológicas, geotécnicas y ambientales, que permita realizar un diagnóstico de los problemas de la manera más exacta posible y proponer un diseño efectivo de solución.

Es necesario conocer cuáles son los parámetros básicos que afectan la estabilidad. Algunas etapas que se utilizan con este fin, según Sánchez (2009), son las siguientes: reconocimientos previos de campo, tomas de muestra e investigación de detalle, que se describen a continuación.

2.4.1. Reconocimientos previos de campo

Se identifica el tipo y causa del movimiento. Algunos de los rasgos característicos que se consideran son los siguientes: rupturas de pendiente con acumulación de material al pie del talud, bloques caídos a pie de

acantilados o escarpes, planos inclinados lisos rocosos con aspecto fresco y bloques deslizados, macizos fracturados y meteorizados con bloques o cuñas caídas y deslizadas, presencia de grietas de tracción, hundimientos con grietas de tracción, reptaciones de material blando, señales de avalanchas o flujos y laderas escalonadas y agrietadas y con escarpes.

Aparte de estos rasgos, el efecto sobre las construcciones o la vegetación pueden dar señales que faciliten su identificación, por ejemplo, árboles, arbustos o postes inclinados a favor de la pendiente o vegetación con raíces arrancadas y árboles desenterrados y arrastrados.

En términos generales, los requisitos para realizar la evaluación preliminar de un talud comprenden un estudio de la información disponible, una inspección inicial de las condiciones del talud o ladera y estudios complementarios, como el levantamiento topográfico y el reconocimiento geológico preliminar (ACG, 2009).

Un elemento importante a destacar es que el *Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica* (2015) lista un grupo de fuentes de información de gran valor particular en el caso de Costa Rica.

Todos estos aspectos mencionados para realizar el reconocimiento previo en campo, así como lo señalado en el cuadro 2.1, son elementos de gran importancia de los cuales no se puede prescindir, por lo que se considera que se deben tomar en cuenta en los estudios de estabilidad de taludes.

2.4.2. Investigación de detalle

La investigación detallada se realiza para comprender, con mayor profundidad, los fenómenos que influyen en la estabilidad de los taludes. Entre los métodos de investigación de detalle se destacan según Sánchez (2009):

Sondeos mecánicos: Permiten reconocer el terreno a lo largo de su profundidad, con la posibilidad de extracción de muestras que se analizan en los laboratorios para la determinación de las propiedades físico-mecánicas.

Ensayos in situ: Tienen como objetivo estimar las características mecánicas o hidrogeológicas del terreno.

Ensayos de suelos: Constituyen el medio más eficaz para conocer las distintas propiedades de los suelos y evaluar su comportamiento.

Entre los ensayos de suelos se pueden mencionar:

- a) Identificación: granulometría, límites de Atterberg: líquido, plástico, retracción; contenido en carbonatos, sulfatos y materia orgánica, peso específico de partículas y densidades.
- b) Composición química y mineralógica
- c) Densidad y humedad que presenta el suelo *in situ*, en su estado natural.
- d) Medida de la susceptibilidad a erosión.

Por otro lado, entre los ensayos de comportamiento mecánico se pueden citar:

- a) Expansibilidad.
- b) Consolidación.
- c) Resistencia al cortante.

Para elegir el tipo de ensayo, se debe tener en cuenta el tipo de terreno que se va a investigar y el tipo de problema que se debe resolver, por ejemplo, si se trata de un análisis de riesgos de inestabilidad en taludes naturales, de un proyecto de nuevos taludes o bien de corrección de inestabilidades ya producidas.

Las investigaciones geotécnicas detalladas requeridas para construir el modelo geotécnico de un talud o ladera incluyen la planificación de la investigación, el alcance de la investigación con base en el nivel del riesgo, definición de la complejidad geotécnica del talud, las etapas de la ejecución de la investigación geotécnica y, finalmente, la investigación de campo y de laboratorio (ACG, 2009).

2.4.3. Toma de muestras

Una vez que se ha realizado el reconocimiento de la zona para el estudio de los movimientos de masa y con el fin de caracterizar las propiedades del suelo o roca blanda, se procede a la ejecución de la toma de muestras. Este aspecto es muy importante, ya que muchos de los problemas que tienen lugar durante la construcción pueden ser evitados mediante un adecuado muestreo. La calidad de las muestras es un factor muy importante para que los resultados de los ensayos sean confiables.

Existen dos formas generales para la obtención de muestras: muestras alteradas y muestras inalteradas.

Muestra alterada: Es la muestra representativa del suelo que conserva su composición mineralógica, pero no conserva las condiciones que tenía la muestra en el terreno. Las muestras alteradas se utilizan para realizar los ensayos de clasificación de suelos y los ensayos físicos, por ejemplo, el ensayo granulométrico, el de los límites de consistencia, el de peso específico relativo o clasificación del suelo.

Las muestras alteradas se pueden obtener mediante perforaciones exploratorias en campo, como la perforación con barrena, el sondeo de lavado, la perforación rotatoria o sondeo por percusión. Entre los muestreadores que se utilizan para la obtención de muestras alteradas, se pueden mencionar el muestreador de media caña estándar (muestreador de tubo partido o de pared gruesa), el extractor de núcleos de manantial y el cucharón rascador (Das, 2001b).

En los taludes objeto de estudio puede ser utilizado el muestreador de tubo partido mediante el método de prueba de penetración estándar (SPT, por sus siglas en inglés), de la norma ASTM D1586 *Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils* (ASTM International, 2008). Éste es un ensayo de campo y es uno de los ensayos más ampliamente usados para la exploración de suelos, utilizado para determinar la medida de la resistencia a la penetración del muestreador, así como para tomar muestras representativas del suelo.

De acuerdo con la norma ASTM D-1586, el método SPT consiste en hincar una tubería con tomamuestras (diámetro exterior de 51 mm e interior de 35 mm), contando el número de golpes necesarios para hincar tramos de 15 cm. La hincada se realiza mediante una maza de 63,5 kg que cae desde una altura de 760 mm sobre una cabeza de golpeo. En total, se registran 3 tramos de 15 cm cada uno, de los cuales, las lecturas del primero no son tomadas en cuenta, por posible alteración del suelo y derrumbes. Los valores de los golpes de los tramos II y III, sumados, conducen al parámetro N_{SPT} .

El número de golpes N_{SPT} permite, a través de correlaciones, estimar diferentes propiedades geotécnicas de resistencia y deformabilidad en suelos granulares y cohesivos (Soriano, s.f.).

Muestra inalterada: Es la muestra representativa del suelo que conserva las condiciones que tenía en el sitio, como la composición mineralógica, el contenido de humedad y, principalmente, su estructura. Estas muestras se utilizan para realizar ensayos de resistencia, como lo son las pruebas triaxiales o de corte directo. Estas muestras se deben obtener por medio de muestreo en trincheras, muestreos superficiales, con tubos de pared delgada (*Shelby*, Pistón, Laval, *Sherbrook*), con tubos de rotación o empuje (Denison, Pitcher) o muestras de bloque.

Uno de los métodos de muestreo utilizados para minimizar el grado de alteración y que, en investigaciones puntuales, es adecuada su aplicación, es el bloque tallado a mano a cielo abierto. En este método, que se utilizó en los taludes objeto de estudio, la muestra se coloca en cajones protectores, de 200 x 200 mm, inmediatamente después de cortado el suelo y se agregan coberturas de parafina. Los tamaños anteriormente

indicados se utilizan debido a la dificultad que significa transportar muestras de este tipo en gran tamaño. El procedimiento para la toma de muestras inalteradas por medio del bloque se muestra en la figura 2.15.

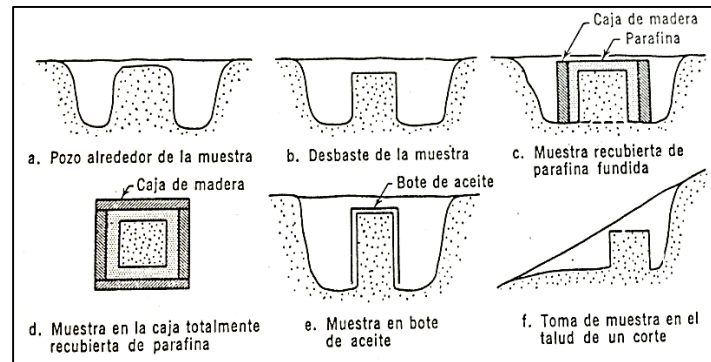


Figura 2.15. Procedimiento general para la toma de muestras inalteradas
Fuente: Sowers & Sowers (1972)

2.5. Ensayos geofísicos. Sísmica de refracción

Los ensayos geofísicos generalmente constituyen la forma más rápida de obtener información sobre las características de los perfiles del subsuelo en áreas relativamente grandes. Es importante aclarar que estas técnicas no reemplazan los sondeos y deben utilizarse con un control de campo muy estricto (Suarez, 1998).

Con los métodos geofísicos se estiman las propiedades físicas del terreno, estratigrafía de los materiales, zonas de debilitamiento y posibles planos de falla, niveles freáticos, así como las propiedades de los suelos y de las rocas, para deducir su comportamiento mecánico.

Entre los métodos geofísicos más utilizados actualmente se pueden mencionar los que se muestran en la figura 2.16.

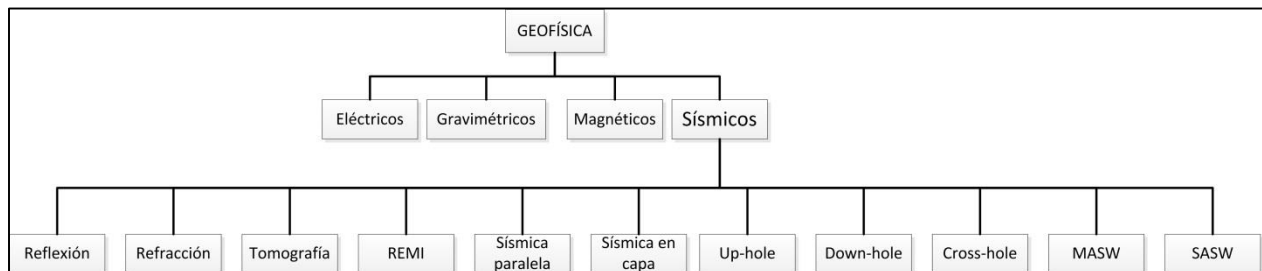


Figura 2.16. Esquema de los métodos geofísicos

De todos los métodos mencionados en la figura 2.16, los métodos sísmicos de refracción son los que se aplican en estudios de estabilidad de taludes, especialmente en Costa Rica.

La sísmica de refracción es uno de los métodos indirectos de exploración más utilizados en etapas preliminares. Constituye un procedimiento simple y convencional para investigar preliminarmente el perfil del suelo y roca sobre una gran extensión. La sísmica de refracción consiste en determinar los tiempos de recorrido de las ondas P desde un punto conocido (fuente sísmica) hasta una serie de receptores (geófonos) situados a lo largo de una línea en la superficie del terreno. La energía que se aplica es producida por medio de impacto o explosión, ésta se propaga en el subsuelo y es detectada en un punto a cierta distancia desde la fuente. Conociendo el tiempo de recorrido que las ondas P emplean en recorrer la distancia que separa la fuente y los receptores, se puede determinar la velocidad de propagación del medio situado entre ambos (Huamán & Aguilar, 2001).

Este método se utiliza para representar la profundidad con respecto al sustrato rocoso o al nivel freático, la estratigrafía o la litología. La velocidad de la onda sísmica calculada está relacionada con las propiedades mecánicas del material (ASTM International, 2000).

El procedimiento esquemático de este ensayo se muestra en la figura 2.17.

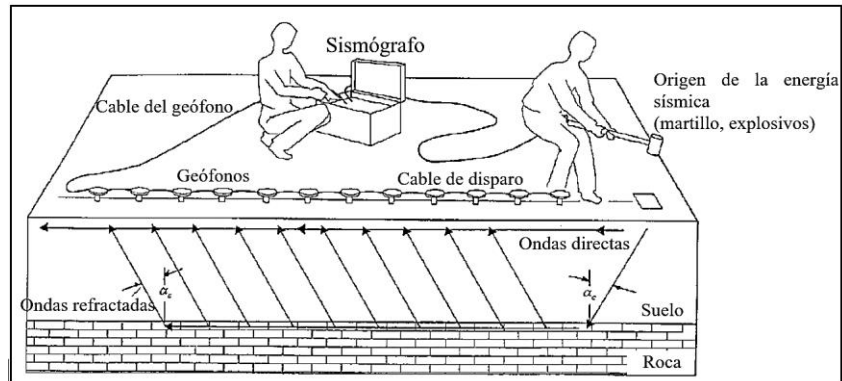


Figura 2.17. Método de refracción sísmica
Fuente: ASTM International (2000)

Como se muestra en la figura 2.18, en el caso de la trayectoria de las ondas en el método de la refracción sísmica, se considera un medio con velocidad V_1 , que es supra yacente a un medio semi-infinito con velocidad V_2 , mayor que V_1 . Una vez que se han generado las ondas en la fuente de las mismas, éstas empiezan a viajar por el medio superior, conformando frentes de onda en el espacio (López, Mejía & Vega, 2008).

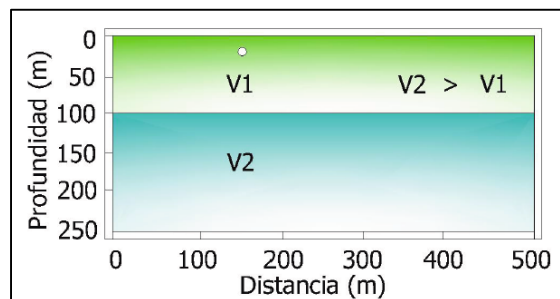


Figura 2.18. Modelo de dos capas en sísmica de refracción
Fuente: López et al., (2008)

Los datos obtenidos son registrados, visualizados y revisados. Se elabora el gráfico llamado “gráfico tiempo-distancia”, en el cual, en el eje de las abscisas se representan las distancias desde la fuente hasta cada detector y, en el eje de las ordenadas, los respectivos tiempos de primera llegada. Las curvas representadas son domocónicas (Cavada, 2000).

Las velocidades que se calculan tienen relación con la cuantificación de diferentes tipos de material detectados en profundidad, algunos de ellos se encuentran en las norma D-5777 de la ASTM (*Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation*) (ASTM International, 2000).

Como es sabido, los métodos de investigación geofísica, y en este caso en particular la sísmica de refracción, constituyen un apoyo a los métodos directos para la definición del modelo geotécnico, pero de ninguna manera los sustituyen (ACG, 2009).

En esta investigación es factible el empleo del ensayo de sismica de refracción para que, con los datos obtenidos, se puedan inferir las propiedades mecánicas del suelo y rocas blandas, fundamentales para el desarrollo del modelado.

2.6. Clasificación geomecánica de los macizos rocosos

Los sistemas de clasificación de los macizos rocosos tienen por objeto evaluar sus características para determinar de forma cuantitativa su calidad, se utilizan mucho en la actualidad, en especial en los estudios geotécnicos de túneles. La clasificación geomecánica se utiliza para hacer una predicción del comportamiento del macizo rocoso frente a excavaciones subterráneas o a cielo abierto; se caracteriza por su fácil aplicación y su utilidad radica en los buenos resultados conseguidos, en muchos casos con importantes beneficios para la ingeniería (Monge & Ramírez, 2004).

Según Monge & Ramírez (2004), en cuanto al tema de la estabilidad de los taludes, las clasificaciones geomecánicas son de gran utilidad en las fases iniciales del estudio en conjunto con otras herramientas para la toma de decisiones, además, presentan la ventaja de que permiten obtener, mediante correlaciones establecidas, los principales parámetros mecánicos del macizo rocoso como, por ejemplo, el módulo de elasticidad o los coeficientes del criterio de rotura Hoek-Brown.

Las tres clasificaciones más utilizadas actualmente para la estimación de la resistencia y comportamiento de los macizos rocosos son el RMR de Bieniawski, la de Barton, Lien y Lunde (Q) y la de Hoek-Brown (GSI). Las dos primeras emplean el parámetro RQD (índice de la calidad de la roca, por sus siglas en inglés), que constituye la base de la clasificación de Deere. Estas clasificaciones fueron creadas originalmente para excavaciones subterráneas, sin embargo, el RMR se ha extendido a otras aplicaciones como, por ejemplo, la estabilidad de taludes.

Grado de meteorización de la roca

La evaluación del grado de meteorización del macizo rocoso se realiza por observación directa del afloramiento y comparación con los datos incluidos en el cuadro 2.2.

Cuadro 2.2. Evaluación del grado de meteorización del macizo rocoso

Término	Descripción	Grado
ROCA FRESCA	No presenta signos visibles de meteorización en la roca, tal vez una leve decoloración en las superficies de las discontinuidades mayores.	I
LEVEMENTE METEORIZADA	La decoloración indica meteorización de la roca y en las superficies de las discontinuidades. La roca en su totalidad puede estar decolorada por la meteorización o puede estar externamente algo más débil que en su condición fresca.	II
MODERADAMENTE METEORIZADA	Menos de la mitad de la roca está descompuesta o desintegrada como un suelo. La roca fresca o decolorada se puede presentar como colpas o testigos continuos.	III
MUY METEORIZADA	Más de la mitad de la roca está descompuesta o desintegrada como un suelo. La roca fresca o decolorada se puede presentar como colpas o testigos discontinuos.	IV
COMPLETAMENTE METEORIZADA	Toda la roca está descompuesta o desintegrada como un suelo. La estructura original del macizo aún se mantiene en gran parte intacta.	V
SUELO RESIDUAL	Toda la roca está convertida en suelo. La estructura del macizo y la fábrica del material están destruidas. Existe un gran cambio de volumen; sin embargo, el suelo no ha sido transportado significativamente.	VI

Fuente: González de Vallejo, Ferrer, Ortuño & Oteo (2002)

Clasificación de Bieniawski (1989), RMR

Esta clasificación ha sido muy utilizada para estimar las propiedades del macizo rocoso. La estructura de un macizo comprende un conjunto de fallas, diaclasas, pliegues y demás características geológicas propias de una determinada región. Para aplicar esta clasificación se divide el macizo rocoso en zonas o tramos que presenten características geológicas más o menos uniformes, de acuerdo con las observaciones hechas en campo, que permiten la toma de datos y medidas referentes a las propiedades y características de la matriz rocosa y de las discontinuidades.

El índice que define la clasificación es el RMR, que, para evaluar el macizo rocoso, utiliza los siguientes parámetros: resistencia a la compresión uniaxial o confinada de la roca intacta, designación de la calidad de la roca RQD, espaciamiento de las discontinuidades, condición de las discontinuidades, condiciones de flujo de agua y orientación de las discontinuidades.

Estos parámetros son determinados tanto a partir de ensayos de laboratorio realizados en la roca intacta, como de información en el campo, que puede ser recopilada a partir de perforaciones o afloramientos, como es el caso de los taludes, o bien de paredes de galerías exploratorias.

A cada uno de los parámetros anteriores se asigna un valor y el RMR se obtiene como resultado de la suma de todos ellos; el valor del RMR varía de 0 a 100. Los valores que se asignan a cada parámetro, así como el ajuste de los valores de la orientación de las discontinuidades, se muestran en el Anexo 1.

La determinación final de la clase del macizo rocoso se muestra en el cuadro 2.3.

Cuadro 2.3. Determinación de la clase del macizo rocoso

VALOR TOTAL DEL R.M.R.	81-100	61-80	41-60	21-40	<20
CLASE DE NÚMERO	I	II	III	IV	V
DESCRIPCIÓN	MUY BUENO	BUENO	MEDIO	MALO	MUY MALO

Fuente: Monge & Ramírez (2004)

El cálculo del RMR permite la obtención de los valores de la cohesión y del ángulo de fricción mediante correlaciones y por medio de las siguientes fórmulas:

$$c = 5 \times RMR(kPa) \quad (2.1)$$

$$\phi = 5 + \frac{RMR}{2} \text{ (grados)} \quad (2.2)$$

Donde c es la cohesión y ϕ es el ángulo de fricción.

Una breve explicación de cada uno de los parámetros se presenta a continuación:

✓ Resistencia a la compresión uniaxial o confinada de la roca intacta

El análisis de la resistencia de la roca intacta se puede determinar indirectamente mediante el ensayo del martillo del geólogo. Este ensayo consiste en golpear una muestra de mano con dicho martillo y estimar un intervalo de resistencia de la matriz rocosa en función del efecto producido descrito en cuadros con claves similares a las indicadas en el Anexo 1.

✓ Designación de la calidad de la roca (RQD)

El RQD fue desarrollado por Deere (1967) y establecido en la norma ASTM D 6032 (ASTM International, 2006) para estimar cuantitativamente la calidad del macizo rocoso basándose en la recuperación de un testigo. Este parámetro se obtiene a partir del porcentaje de trozos de testigo mayores que 100 mm recuperados de un sondeo y permite estimar el grado de fracturación del macizo rocoso. El diámetro del

testigo tiene que ser igual o superior a 57,4 mm, y tiene que ser perforado con un doble tubo de extracción de testigo. El valor de RQD es igual al porcentaje de fragmentos de longitud superior a 100 mm sobre la longitud total del testigo. En el Anexo 1 se muestra un ejemplo del cálculo del RQD con sus expresiones algebraicas.

En el caso de no disponer de testigos de roca, el RQD se puede calcular por medio de las fracturas expuestas. En este caso se coloca una regla de 2,00 m de longitud en varias direcciones, sumando las distancias entre las fracturas de la pared rocosa mayores a 100 mm a lo largo de los 2,00 m y dividiendo este resultado entre la longitud de la regla, tomando en cuenta que sean las mismas unidades de medida, y multiplicando por 100 para convertirlo a tanto por ciento (Suarez, 2012).

En el cuadro 2.4 se observan los intervalos para calificar la calidad de la roca tomando en cuenta el RQD.

Cuadro 2.4. Relación entre el RQD y la calidad de la roca

RQD (%)	Calidad de roca
< 25	Muy mala
25-50	Mala
50-75	Regular
75-90	Buena
90 - 100	Excelente

Fuente: ASTM International (2006)

✓ **Espaciamiento de las discontinuidades**

Se define como la distancia entre dos planos de discontinuidad de una misma familia, medida en la dirección perpendicular a dichos planos. El objetivo de determinar este parámetro en la clasificación RMR es estimar el tamaño de los bloques que componen el macizo, así como determinar algunas propiedades del macizo como la facilidad de excavación, fragmentación y permeabilidad.

✓ **Condición de las discontinuidades**

La determinación del estado en el que se encuentran las discontinuidades contempla el análisis de diversos aspectos. Para definir la condición de la discontinuidad se mide la longitud de ésta, además se mide la abertura, que es la distancia perpendicular que separa las paredes de la discontinuidad; se mide también la rugosidad que representa un índice de la ondulación de las paredes de las caras adyacentes de la discontinuidad, cuya descripción y medida tiene como principal finalidad la evaluación de la resistencia al corte de los planos. Es importante mencionar que la rugosidad aumenta la resistencia al corte, que decrece con el aumento de la abertura y, por lo general, con el espesor de relleno. En cuanto al relleno de las discontinuidades, que se define como el material que separa las paredes adyacentes de las caras de la discontinuidad, puede ser material de naturaleza distinta a la roca de las paredes, blando o alterado, que puede sufrir variaciones por cambios en el contenido de humedad o por movimientos a lo largo de las juntas, por ejemplo, puede ser material arenoso, limo o arcilla. El nivel de alteración de la cara de la discontinuidad también se debe caracterizar, ya que posee una marcada influencia sobre la resistencia al corte y deformabilidad de la misma.

✓ **Condiciones de flujo de agua**

Se refiere a las condiciones generales de humedad en las discontinuidades, pueden estar secas, húmedas, o bien puede haber agua fluyendo.

✓ **Orientación de las discontinuidades**

Se refiere al valor de corrección que hay que aplicar teniendo en cuenta la orientación de las discontinuidades. En el caso de los taludes, se debe observar la manera en que las discontinuidades están

direccionadas, ya que puede ser tal que induzca a la falla del talud, provocando caída de bloques, caída de cuñas, inclinación o volteo o roturas planas a lo largo de las discontinuidades.

Se considera factible el uso de la clasificación RMR en la investigación de los taludes objeto de estudio para el análisis de suelos o rocas blandas o alterados. Puede ser utilizado como una forma de estimar valores de m , s y GSI del criterio de rotura Hoek-Brown, para finalmente evaluar la resistencia del macizo rocoso. Con la calidad del macizo obtenida existen correlaciones que permiten inferir propiedades mecánicas del macizo; además, existen programas como el RocData 3.0® (*Rocscience Inc.*, 2004), que permite, a partir de estas clasificaciones, inferir las propiedades del macizo. RocData 3.0® es un conjunto de herramientas versátil para el análisis de datos de roca, la resistencia del suelo, la determinación de las envolventes de esfuerzos y otros parámetros físicos. Utiliza los modelos de resistencia más utilizados en la ingeniería geotécnica, como el criterio de Hoek-Brown y el modelo constitutivo de Mohr-Coulomb, entre otros.

A pesar de que el RMR fue originalmente destinado para ser aplicado en túneles, su uso ha sido común en aplicaciones de la ingeniería civil, como la caracterización de la resistencia y deformación del macizo rocoso y para el diseño de fundaciones y taludes. Asimismo, el índice GSI también ha sido ampliamente utilizado en la práctica de la ingeniería geotécnica. Existe una correlación entre el GSI y el $RMR_{b,s, seco}$, para la cual, basado en diversos análisis, se ha propuesto la ecuación (2.3) como aplicación práctica para la correlación de ambos índices, la cual permite utilizar los datos experimentales de RMR en contraste con los resultados de los cálculos basados en GSI, y viceversa (Ceballos & Olalla, 2014):

$$GSI = RMR_{b,s} - 5 \quad (2.3)$$

Donde:

GSI = Índice geológico de resistencia,

RMR = Índice de clasificación geomecánica del macizo rocoso,

b = básico, sin corregir por la orientación de las discontinuidades, y

s = seco, considera que no hay presencia de agua en el macizo.

Ha existido esfuerzo previo para correlacionar ambos índices por medio de la clasificación y estudio de diferentes tipos de condiciones geomecánicas, el análisis de ecuaciones propuestas por Hoek y el desarrollo de análisis estadísticos. De lo anterior se obtiene la ecuación (2.3), la cual es importante para aplicaciones prácticas, además, es similar a las propuestas de los diferentes autores estudiados (Ceballos & Olalla, 2014).

2.7. Modelos constitutivos de resistencia cortante en suelos

Los modelos constitutivos de resistencia cortante son expresiones matemáticas que se utilizan para modelar el comportamiento mecánico de los materiales involucrados en el estudio de los taludes. Existen modelos constitutivos que expresan relaciones esfuerzo-deformación y otros que expresan relaciones tensión-deformación de un material especialmente en el caso de los suelos no saturados. Los resultados de ambos permiten identificar las posibilidades y condiciones de aplicación en el análisis y diseño de estructuras geotécnicas.

Existen innumerables modelos constitutivos y actualmente se sigue trabajando en la formulación de otros nuevos, con el objetivo de conseguir una formulación acorde con el problema que se quiere resolver (Pérez, 2005). Los modelos constitutivos del suelo, de acuerdo con Herrera, (2006), se pueden clasificar de la siguiente manera:

Modelos lineales: encuentran su mayor aplicación en el análisis de tensiones de los elementos estructurales de los metales; sin embargo, los mismos no son aplicables en la mecánica de suelos, debido al comportamiento no lineal de la relación esfuerzo-deformación que los caracteriza.

Modelos no lineales: están constituidos por modelos elásticos y plásticos y dentro de estos, los elastoplásticos, según el comportamiento de la relación esfuerzo-deformación del material. La no linealidad implica que los parámetros elásticos no son constantes, sino que dependen del estado esfuerzo-deformación del suelo (González, Herrera, Iglesias & López, 2013). Los modelos no lineales elásticos se pueden representar de forma bilinear, multilinear e hiperbólicos; estos últimos tienen gran aplicación en la descripción del comportamiento mecánico de los suelos agrícolas. Dentro de los modelos hiperbólicos se pueden mencionar el modelo elástico no lineal de Duncan & Chang (1970), el cual se desarrolla bajo la idea de que la curva esfuerzo-deformación obtenida de ensayos de compresión triaxial drenados se aproxima a una hipérbola. Otro modelo elástico no lineal es el modelo exponencial de Bailey y Johnson (1989), el cual predice la deformación volumétrica del suelo bajo compresión hidrostática. Este modelo se mejoró cuando se incluyó el efecto del esfuerzo cortante (González et al., 2013).

Dentro de los modelos plásticos se encuentran los elastoplásticos, modelos más realistas que consideran que el suelo puede sufrir deformaciones tanto elásticas como plásticas, en dependencia de la magnitud de las cargas que se le estén aplicando. Con base en los criterios elastoplásticos se han fundamentado muchos de los modelos constitutivos empleados para representar la compactación del suelo. Dentro de esta categoría se encuentra el modelo constitutivo Mohr-Coulomb, el cual se utiliza en este estudio que, además de su sencillez, el hecho de que para su aplicación solo sea necesario obtener la cohesión y el ángulo de fricción interna del suelo en estudio mediante ensayos triaxiales o de corte directo, han hecho que sea uno de los modelos más conocidos y empleados (González et al., 2013). Además, el modelo Mohr-Coulomb es el más conservador en la predicción de la resistencia cortante para deformación plana y, quizás, por eso es el más usado (Waterman & Álvarez, 2012). Se tiene también el modelo de endurecimiento (*Hardening Soil*), el cual es considerado como una variante elastoplástica del modelo hiperbólico; hace uso de la teoría de la plasticidad, en lugar de la teoría de la elasticidad, además de incluir en su formulación el fenómeno de dilatación en el suelo (Nieto, Camacho & Ruiz, 2009).

Dentro de los modelos constitutivos no lineales elastoplásticos, se encuentran los criterios de falla o fluencia que asumen la deformación por corte; estos pueden incluir o no los componentes friccionales de los esfuerzos cortantes, como es el caso de los criterios de fluencia Tresca y Von Mises, que no incluyen los componentes friccionales. Estos criterios fueron desarrollados para metales y no son aplicables en taludes. El criterio de falla Mohr-Coulomb, el criterio de fluencia Drucker-Prager utilizado para fines agrícolas (González et al., 2013) y el de fluencia de Lade sí incluyen los componentes friccionales (Herrera, 2006).

Por otro lado, se tiene el caso de los modelos que consideran que el suelo se deforma plásticamente producto de la compresión volumétrica; los criterios de fluencia desarrollados para estos tipos de deformaciones son el criterio de Drucker-Gibson-Henkel, el criterio de Cam Clay para arcillas normalmente consolidadas o ligeramente sobreconsolidadas (Ayala, 2013), el criterio Roscoe-Burland, el criterio de Dessai-Siriwardane, el criterio de Weidiinger (Cap model) y el criterio de Lade (Herrera, 2006).

Modelos tenso-deformacionales: Son utilizados en suelos no saturados. En condiciones no saturadas y no drenadas, la succión matricial constituye una variable adicional. El cambio volumétrico asociado con suelos colapsables se analiza con estos modelos. Entre estos modelos se encuentra el modelo de colapso relativo, en el cual la magnitud de colapso relativo es función del incremento de humedad experimentado por el suelo y la tensión vertical actuante durante el proceso de humedecimiento, y el modelo elastoplástico, que representa cambios volumétricos en suelos, mediante un modelo elástico con endurecimiento. Este modelo emplea dos variables de tensiones independientes, la tensión neta y la succión (Zeballos, Aiassa & Terzariol, 2007). Dentro de estos modelos elastoplásticos se encuentra el Barcelona Basic Model, utilizado para describir el comportamiento tensión-deformación de suelos no saturados, poco o moderadamente expansivos (Alonso, Gens & Josa, 1990).

Modelos estáticos o dinámicos (reológicos): Los modelos constitutivos dinámicos son aplicables al comportamiento dependiente del tiempo, donde las fuerzas de inercia tienen una alta incidencia. Dentro de los modelos reológicos básicos, se tiene el modelo de Hooke que explica el comportamiento de los

materiales elásticos, el modelo de Newton sobre los materiales viscosos, el modelo de Coulomb para los materiales plásticos y el modelo de St. Venant que constituye una combinación del modelo de Hooke con el de Coulomb. Otros modelos reológicos producto de la combinación de los anteriores son el modelo de Maxwell, el de Kelvin y el de Bingham (IMT, 1998).

Otros modelos constitutivos que se pueden citar de manera muy general son el modelo de hipoplasticidad, que describe el comportamiento de los suelos no cohesivos incluyendo la no linealidad y la falta de elasticidad (Ayala, 2013); los modelos del estado crítico, que se basan en los estudios de la disipación de la energía dentro del esqueleto del suelo, como el modelo de Cambrige, el modelo de Pender y el modelo de Sandler; los modelos endocrónicos, que estudian las deformaciones inelásticas de los metales basados en el tiempo intrínseco, entre los que se pueden mencionar el modelo de Valanis y el modelo de Bazant; los modelos hipoeelásticos, en los cuales la función que liga el incremento de esfuerzos con el de las deformaciones permanece constante, como es el caso del modelo de Konder-Duncan y el modelo octolineal (Sánchez, 2013). Existen los modelos constitutivos de taludes en movimiento lento, como los modelos viscoplásticos, entre los que se pueden citar el modelo de Bingham y el modelo viscoso de Coulomb, y los modelos elastoviscoplásticos, como el modelo de Perzyna y el modelo de Desai y otros (Mora, 2011).

2.7.1. Criterios de rotura de la matriz rocosa

La resistencia de la matriz rocosa se puede evaluar mediante diversos criterios de rotura, entre los que se puede destacar el de rotura elastoplástico de Mohr-Coulomb y el de Hoek y Brown, que son los más utilizados. El primero utiliza el criterio lineal y el segundo, el criterio no lineal; este último es el más adecuado para el comportamiento real de las rocas. Se describen a continuación de manera general cada uno de los criterios.

Modelo constitutivo Mohr-Coulomb

Este modelo es considerado como una aproximación de primer orden al comportamiento no lineal del suelo. Se basa en el criterio lineal de falla de Mohr-Coulomb. Se trata de un modelo elastoplástico perfecto (isotrópico), desarrollado a partir de la composición de la ley de Hooke y la forma generalizada del criterio de falla Mohr-Coulomb. Puede simular el comportamiento de suelos granulares sueltos o finos normalmente consolidados y se debe tener en cuenta que no representa el comportamiento elastoplástico progresivo, sino que es un modelo elástico y luego plástico perfecto (Nieto et al., 2009).

Este modelo constitutivo es utilizado cuando el criterio de falla se utiliza como una superficie de fluencia junto con comportamiento elástico lineal en cálculos elastoplásticos. Se considera uno de los modelos más conocidos y empleados en investigaciones de suelos y rocas destinados a la construcción ya que, además de su sencillez, generalmente su aplicación se dirige a la obtención de la cohesión y el ángulo de fricción interna mediante ensayos triaxiales o de corte directo (González et al., 2013). La formulación básica del modelo constitutivo Mohr-Coulomb se muestra en la figura 2.19.

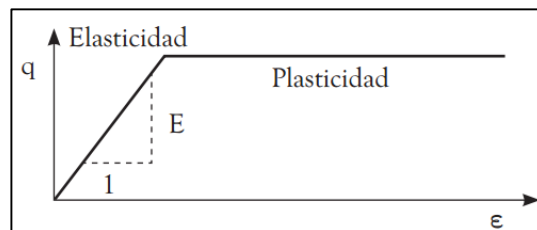


Figura 2.19. Formulación básica del modelo elastoplástico
Fuente: Nieto, Camacho & Ruiz (2009)

Este modelo es mejor utilizado para el cálculo de la resistencia a largo plazo (condición drenada) de los suelos de grano fino y densos de grano grueso. Considera al suelo en falla como dos cuerpos rígidos en planos de discontinuidades (Iturburu, 2015).

Según Sánchez (2013), este modelo se adapta bien en suelos normalmente consolidados donde la resistencia es función tanto del esfuerzo medio aplicado como del ángulo de fricción interna del material. Se ha logrado observar que la superficie de falla real en suelos no difiere mucho de la considerada en la teoría de Mohr-Coulomb si se realizan suficientes ensayos con diferentes tipos de suelos.

El modelo expresa la resistencia al corte a lo largo de un plano, mediante la relación entre los esfuerzos normal y tangencial actuantes en el momento de la rotura y los parámetros de cohesión y el ángulo de fricción interna, como sigue:

$$\tau = c' + \sigma'_n \tan \phi' \quad (2.4)$$

Donde:

τ = tensión tangencial sobre el plano de rotura, resistencia al corte efectiva en el plano de falla,

σ'_n = tensión normal efectiva sobre el plano de rotura,

c' = cohesión de la matriz rocosa en términos de esfuerzos efectivos, y

ϕ' = ángulo de fricción interna de la matriz rocosa en términos de los esfuerzos efectivos.

Los términos c' y ϕ' deben ser obtenidos mediante ensayos de laboratorio como, por ejemplo, el ensayo de corte directo drenado sobre muestras inalteradas saturadas.

Este criterio, según Galván (2011), tiene la ventaja de ser sencillo, pero presenta ciertas limitantes tales como:

- Las envolventes de la resistencia en roca no son lineales. Se pueden generar errores al considerar los esfuerzos actuantes.
- La dirección del plano de fractura no siempre coincide con los resultados experimentales.
- El criterio sobrevalora la resistencia a la tracción.
- No se recomienda utilizarlo para análisis tridimensional ya que genera esquinas en la superficie de fluencia (sección hexagonal), lo cual afecta la convergencia de los modelos (González et al., 2013).

Criterio de Hoek y Brown

El criterio de Hoek y Brown (1980) fue propuesto inicialmente para ser utilizado en diseño de excavaciones subterráneas en macizos rocosos resistentes. Este criterio considera una particularización de la matriz rocosa, del criterio general de rotura para macizos rocosos isotrópicos, fracturados y sin alterar, expresado de la siguiente manera (Galván, 2011b):

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \cdot \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (2.5)$$

Donde:

σ'_1, σ'_3 = tensiones principales efectivas mayor y menor en rotura,

σ_{ci} = resistencia a compresión simple de la matriz rocosa, y

m_b = constante adimensional dependiente de m_i , GSI y D.

(2.6)

$$m_b = m_i \cdot e^{\frac{GSI-100}{28-14D}}$$

Donde:

- m_i = constante adimensional que depende de la matriz,
- GSI = Índice Geológico de Resistencia,
- D = factor que varía de 0 a 1, que depende del grado de alteración del macizo sujeto a voladuras, y
- s,a = constantes adimensionales que dependen del macizo, que se evalúan con las expresiones.

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \quad (2.7)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \quad (2.8)$$

Estas ecuaciones son guías que pueden ser utilizadas para proporcionar un punto de partida realista para cualquier diseño (Hoek, Carranza & Corkum, 2002).

Shen, Priest & Karakus (2012) propone una solución analítica aproximada para estimar el equivalente de los parámetros de resistencia al cortante Mohr-Coulomb para rocas altamente fracturadas que cumplen con el criterio de Hoek y Brown.

Esta solución produce resultados bastante buenos cuando $0 < GSI < 40$, y provee gran flexibilidad para la aplicación del criterio de Hoek y Brown en combinación con el MEL para el análisis de estabilidad de taludes de macizos rocosos altamente fracturados (Shen et al., 2012).

Los parámetros de resistencia al cortante Mohr-Coulomb (c y ϕ) se obtienen de las ecuaciones (2.9), (2.10), (2.11) y (2.12).

$$\phi = \arcsin \left(1 - \frac{2}{2 + am_b \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} m_b + s \right)^{a-1}} \right) \quad (2.9)$$

$$\frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} = \frac{\sigma_n}{\sigma_{ci}} - \frac{\left(\frac{m_b \sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a}{2 + am_b \left(\frac{m_b \sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{a-1}} \quad (2.10)$$

Como el término (σ_3/σ_{ci}) se presenta en ambos lados de la ecuación (2.10), para la obtención de un valor aceptable para dicho término, la ecuación (2.10) se debe resolver por medio de iteraciones, lo que corresponde al paso crítico de la solución. Una vez obtenido el valor de (σ_3/σ_{ci}) , el ángulo de fricción (ϕ), el esfuerzo cortante (τ) y la cohesión (c), pueden ser calculados directamente de las ecuaciones (2.11) y (2.12) respectivamente.

$$\tau = \frac{\sigma_{ci} \cos \phi}{2 \left(1 + \frac{\sin \phi}{a} \right)^a} \left(m_b \frac{\sigma_n}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (2.11)$$

$$c = \tau - \sigma_n \tan \phi \quad (2.12)$$

En esta investigación se emplea el criterio de rotura Mohr-Coulomb como modelo constitutivo de caracterización de los materiales, ya que se puede utilizar tanto para el análisis de estabilidad de suelos como para el caso de taludes rocosos (ACG, 2009). Los análisis de los taludes en estudio se realizan según los supuestos de la mecánica de suelos clásica, de acuerdo a la ecuación de tensiones efectivas de Terzaghi y la ley de resistencia al corte de los suelos Mohr-Coulomb.

Como se ha analizado, a partir de los análisis de Shen et al. (2012), Ceballos & Olalla (2016), Hoek, Carranza & Corkum (2002), Galván (2011), así como de lo establecido en el *Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica* (2015) y en el CCCR (2009), las rocas blandas, por sus características geotécnicas, se pueden evaluar mediante modelos de clasificación de macizos rocosos haciendo uso del RMR y del criterio Hoek y Brown. Con ellos se aplican correlaciones para obtener los parámetros de resistencia del suelo Mohr-Coulomb, adaptable a la rotura circular, generando resultados confiables.

Del mismo modo, los programas RocData® y SLOPE/W®, en sus cálculos contemplan el uso de las ecuaciones correspondientes a cada una de las clasificaciones de macizo rocoso mencionadas y que pueden ser utilizados en los análisis de los taludes en estudio; por lo tanto, al tener implementados dichos procedimientos, el uso de los programas es una vía adecuada para la simplificación de los análisis.

2.8. Resistencia al cortante. Condiciones drenadas y no drenadas

Los problemas de estabilidad de taludes pueden analizarse suponiendo sistemas de esfuerzos totales o efectivos. En principio, siempre es posible analizar la estabilidad de un talud utilizando el método de presión efectiva, porque la resistencia del suelo es gobernada por las presiones efectivas tanto en la condición drenada, como en la condición no drenada (Suarez, 1998).

El esfuerzo total se refiere a la suma de todas las fuerzas, incluyendo aquellas transmitidas a través de contacto entre las partículas y aquellas transmitidas a través de presiones de agua dividido por el área total. El área total incluye tanto el área de los vacíos como el área de los sólidos. Los valores de esfuerzo total son definidos sin hacer referencia a cuánta cantidad de fuerza tiene que ser asumida por los contactos entre las partículas, o cuánto es transmitido a través de la presión del agua, el esfuerzo total depende únicamente del equilibrio.

El esfuerzo efectivo incluye sólo las fuerzas que son transmitidas a través del contacto entre partículas divididas por el área total, lo que quiere decir que es igual al esfuerzo total menos la presión del agua. Cuando la carga se mantiene por un tiempo determinado, ocurrirá drenaje y la condición drenada se logra cuando no hay diferencia entre la presión del agua dentro del material y la presión del agua afuera del material. Los esfuerzos efectivos son los que controlan el comportamiento del suelo al cortante (Duncan, Wright & Brandon, 2014).

La resistencia al cortante se define como el máximo valor de esfuerzo cortante que puede soportar el suelo (Duncan et al., 2014). Se debe entender la naturaleza de la resistencia al cortante para analizar los problemas de la estabilidad del suelo como es el caso de la estabilidad de taludes en el presente estudio (Das, 2001a).

La ecuación (2.4) representa la relación utilizada para definir la resistencia al cortante del suelo en función del criterio de falla Mohr-Coulomb. La envolvente de falla de Mohr-Coulomb y los dos parámetros requeridos para su descripción (c , ϕ) son muy convenientes de utilizar, ya que permiten describir la resistencia del suelo para una gran variedad de condiciones de esfuerzo en el campo (Alva, 1994).

Es importante mencionar que la determinación precisa de las resistencias al cortante es imprescindible para el análisis de estabilidad de taludes; sin embargo, los valores de resistencia al cortante dependen en gran medida de la calidad de la toma de las muestras, su tamaño y el método de análisis.

Los dos factores más importantes que gobiernan la resistencia de los suelos son la magnitud de las fuerzas de contacto entre las partículas y la densidad del suelo. Entre mayores sean las fuerzas de contacto entre las partículas y mayores las densidades, más altas serán las resistencias resultantes.

Aunado a lo anterior, de acuerdo con Duncan et al. (2014), los conceptos de condiciones drenadas y no drenadas son de importancia fundamental en el comportamiento mecánico de los suelos y, en especial, en el caso de estudio; estos conceptos son importantes para comprender el comportamiento de los taludes, sobre todo en formaciones de suelos finos. Las definiciones de estos conceptos se relacionan con la rapidez y la facilidad del agua de movilizarse hacia adentro o hacia afuera del suelo, en comparación con el tiempo que el suelo soporta un cambio de carga. El asunto importante en este tema es si los cambios en las cargas causan cambios en la presión de poro.

Según Duncan et al. (2014), existen dos tipos de análisis de resistencia utilizados en la estabilidad de taludes, que son: la resistencia no drenada y la resistencia drenada.

La resistencia no drenada se utiliza en los análisis con esfuerzos totales y corresponde con la resistencia del suelo cuando se carga hasta la falla en condiciones no drenadas. En el campo las condiciones que se aproximan a la condición no drenada se dan cuando las cargas son aplicadas a una masa de suelo más rápido de lo que el suelo puede drenar.

La condición no drenada es la condición bajo la cual no hay flujo de agua hacia adentro o hacia afuera de una masa de suelo en el tiempo en que el suelo está sujeto a cambios de carga. Los cambios en las cargas en el suelo causan cambios en la presión de agua en los vacíos, debido a que el agua no puede moverse hacia adentro o hacia afuera en respuesta a la tendencia de que el volumen de vacíos cambie, como sucede con la remoción de la parte baja del talud, cuando se presenta un aumento de las cargas en la parte superior del talud, o bien en suelo de baja permeabilidad donde no hay tiempo suficiente para drenar durante el tiempo en que ocurre el cambio de carga.

La resistencia drenada se utiliza en el análisis con esfuerzos efectivos y corresponde a la resistencia cuando el suelo se carga en forma suficientemente lenta como para que no se produzcan presiones de poro en exceso debido a la aplicación de la carga. En el campo, las condiciones drenadas resultan cuando las cargas son aplicadas lentamente a una masa de suelo, o persisten por un tiempo de manera que el suelo pueda drenar.

La condición drenada es la condición en la cual el agua puede fluir hacia adentro o hacia afuera de una masa de suelo en el tiempo en que el suelo se somete a cambios de carga. En este caso, los cambios en las cargas sobre el suelo no causan cambios en la presión de agua en los vacíos del suelo debido a que el agua puede moverse libremente hacia adentro o hacia afuera del suelo cuando el volumen de vacíos crece o decrece en respuesta a los cambios en las cargas.

Comúnmente, los taludes se comportan en condiciones drenadas, se caracterizan en términos de esfuerzos efectivos donde no se tiene aplicación de carga que induzca exceso en la presión de poro, ya que por las condiciones de carga que se presentan, se permite su drenaje en el tiempo (Suárez, 2009).

Duncan (1996) recomienda que para los taludes donde la causa de la falla es el aumento de la presión de poros (debida a las lluvias), el problema debe analizarse como condición drenada.

Desde el punto de vista de la relación esfuerzo-deformación, Suárez (2009) define dos tipos de resistencia:

Resistencia máxima o resistencia pico: Corresponde al punto más alto en la curva esfuerzo-deformación. Es la resistencia al corte máxima de un material que no ha sido fallado previamente. Su uso en los análisis de estabilidad asume que la resistencia pico se obtiene simultáneamente a lo largo de toda la superficie de falla; sin embargo, esto puede conducir a errores ya que en algunos puntos se alcanzan deformaciones mayores que en otros.

Resistencia residual: Es la resistencia al corte que posee el material luego de ser fallado. En los suelos residuales generalmente la resistencia pico y la residual son similares, lo que indica que los suelos residuales son generalmente dúctiles y poco frágiles. La resistencia residual se tiene en cuenta cuando existe una superficie previa de corte donde han ocurrido desplazamientos en el pasado.

La pérdida de resistencia en el momento de la falla al cortante está relacionada con la disminución de la cohesión, y los ángulos de fricción pico y residual son muy similares.

Un ensayo para la determinación de la resistencia al corte es el de corte directo, norma D 3080 de la ASTM (ASTM *International*, 1998b), el cual permite obtener los parámetros específicos de resistencia correspondientes al tipo de análisis que se realice, ajustando las condiciones de ensayo a la situación real y consolidación previa del terreno, velocidad de aplicación de las cargas y el drenaje (ACG, 2009).

Por otro lado, es importante mencionar que el ensayo de laboratorio más difundido para el estudio de la resistencia al cortante es el ensayo de compresión triaxial, normas D 4767 (ASTM *International*, 2011) y D 2850 (ASTM *International*, 2015) de la ASTM; ensayo versátil que permite obtener resultados de corte, como el ángulo de fricción interna (ϕ) y la cohesión (c), en diversas condiciones que pueden ser controladas (González de Vallejo et al., 2002). Estas condiciones corresponden con las que se realizan en los tres siguientes ensayos característicos:

1. Ensayo de compresión triaxial con consolidación previa y rotura con drenaje (CD). En este ensayo se requieren tiempos prolongados (semanas) para obtener los resultados en suelos finos (Valerio, 2011).
2. Ensayo de compresión triaxial con consolidación previa, rotura sin drenaje y medida de la presión intersticial (CU). Este ensayo es aplicable en periodos de procesos constructivos donde no hay tiempo suficiente para permitir drenaje en suelos finos.
3. Ensayo de compresión triaxial sin consolidación previa y rotura sin drenaje (UU). Este ensayo se aplica usualmente en arcillas. A pesar de que no permite determinar los parámetros de resistencia al corte efectivos (c' , ϕ'), proporciona de forma aproximada la máxima tensión de corte disponible frente a procesos de carga en los que se suponga que existen condiciones sin drenaje (González de Vallejo et al., 2002).

En el caso de los taludes en estudio, es factible la aplicación del ensayo de corte directo, por su rapidez en la obtención de los resultados en condición consolidada drenada para la cantidad de muestras estudiadas, además de ser más económico comparado con el ensayo triaxial para la obtención de los resultados que, para propósitos prácticos, son similares en ambos ensayos (Alva, 1994).

2.8.1. Estabilidad a corto y a largo plazo

Las condiciones a corto plazo se refieren a condiciones durante o después de la construcción, es decir, el tiempo inmediatamente después del cambio en las cargas durante el cual se considera que no ocurriría drenaje. Es importante tomar en cuenta la permeabilidad del suelo. Autores como Duncan et al. (2014) llaman a esta condición “estabilidad al final de la construcción”. Debe tenerse en cuenta que los suelos que no tienen un drenaje rápido, están sujetos a sobrepresiones de poros por acción de las cargas aplicadas.

Por ejemplo, en un terraplén arenoso sobre arcilla, en un tiempo de dos meses, se puede asumir que no ocurre drenaje en la fundación de arcilla, pero sí existe drenaje en el material arenoso. En este caso se utilizaría el análisis drenado para el terraplén y no-drenado para la fundación de arcilla.

Para la estabilidad a corto plazo de las arcillas y limos normalmente consolidados, Suarez (1998) recomienda modelar con análisis de esfuerzos totales considerando condiciones no drenadas. Aunque se puede realizar el análisis empleando esfuerzos efectivos, es muy difícil estimar o medir las presiones de poros para su utilización en el análisis. Según Duncan et al. (2014), el análisis de esfuerzos totales se realiza a los suelos en condiciones no drenadas, aplicando el ensayo triaxial consolidado no drenado (CU).

Con respecto a la estabilidad a largo plazo, después de un tiempo el suelo alcanza la condición drenada, en la cual se ha alcanzado la condición de equilibrio de drenaje y no hay exceso de presión de poro debido a cargas externas. En el análisis a largo plazo en taludes, se reflejan las condiciones luego de un tiempo durante el cual el suelo presenta hinchamiento con el incremento del contenido de agua o, bien, se consolida debido a la disminución en el contenido de agua (Duncan et al., 2014).

La variación de las cargas y de la resistencia al cortante a lo largo del tiempo produce cambios en los factores de seguridad de los taludes. Por ejemplo, cuando se crea un talud en arcilla por medio de excavación, la presión de poro en la arcilla disminuye en respuesta a la remoción del material excavado; luego, con el pasar del tiempo, las presiones de poro en exceso negativas se disipan y la presión de poros eventualmente regresa a valores gobernados por las condiciones del agua subterránea (Duncan et al., 2014).

La estabilidad a largo plazo es más fácil de analizar que la estabilidad a corto plazo; sin embargo, la obtención de los parámetros de resistencia es más costoso. Para todos los casos, se recomienda emplear análisis de esfuerzos efectivos (Suarez, 1998).

En el caso de estabilidad de laderas, se recomienda la realización de análisis en términos de esfuerzos efectivos, con criterios de evaluación de las condiciones de presión de poros. En particular, se debe tomar en cuenta el nivel freático cuando ocurra la lluvia máxima prevista en proyecto (Morales, 2012).

La estabilidad de taludes en una construcción, durante o cuando ya está recién finalizada, se realiza analizando las condiciones drenadas o no-drenadas, según sea su permeabilidad. En suelos arcillosos, es posible que se necesite realizar análisis de resistencia no-drenada y en suelos arenosos, con resistencia drenada.

Las arcillas blandas y limos fallan en condiciones no drenadas porque el exceso de presión de los poros es positivo y, por lo tanto, la condición crítica es a corto plazo, pues a medida que las arcillas disipan el exceso de presión de los poros, las mismas se consolidan y ganan resistencia. Un suelo verdaderamente homogéneo exhibe la misma resistencia al corte sin drenar en todos los puntos de su masa. Aunque es obvio que este tipo de condición solo puede existir desde el punto de vista teórico (Romero, 2011).

En términos generales, las fallas se presentan solamente si los materiales se secan o si se saturan completamente, puesto que en condiciones intermedias la succión aporta una resistencia adicional. Además, la saturación produce aumento del peso del material inestable y reducción de la resistencia del suelo en la zona de falla. El efecto de la saturación es la disminución del factor de seguridad. Cabe destacar que este es el tipo de falla más frecuente encontrada en las carreteras de Costa Rica (Ulloa & Vargas, 2007).

2.9. Métodos de análisis de estabilidad de taludes

Es práctica común en ingeniería civil definir la estabilidad de un talud en términos de un factor de seguridad (FS), obtenido de un análisis matemático de estabilidad. Debe incluir factores que incluyan, entre otros, la geometría del talud, parámetros geotécnicos, presencia de grietas de tensión, cargas dinámicas por acción de sismos, flujo de agua o propiedades de los suelos. Hay situaciones en las cuales un enfoque matemático no produce resultados satisfactorios, por lo que debe mejorarse el modelo. A pesar de las debilidades de un determinado modelo, determinar el factor de seguridad suponiendo superficies probables de falla permite al ingeniero tener una herramienta muy útil para la toma de decisiones (Suárez, 2009).

Los métodos de análisis de estabilidad se basan en un planteamiento físico-matemático en el que intervienen las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que actúan sobre el talud y que determinan su comportamiento y condiciones de estabilidad. Se pueden agrupar en dos: métodos determinísticos, dentro de los cuales están los métodos de equilibrio límite y los tenso-deformacionales, y los métodos probabilísticos (Sanhueza & Rodríguez, 2012).

Dentro de las metodologías disponibles para el análisis de la estabilidad de taludes, se encuentran los métodos de equilibrio límite, los métodos numéricos y los métodos dinámicos para el análisis de caídos de roca y flujos, entre otros. En el presente estudio, para el análisis de los taludes, se hace uso del método de equilibrio límite ya que permite calcular el factor de seguridad y estudiar el comportamiento de los parámetros que intervienen en la estabilidad de taludes.

2.9.1. Equilibrio límite y factor de seguridad

El método de equilibrio límite se basa en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable, supone que la resistencia al corte se moviliza total y simultáneamente a lo largo de la superficie de corte. Consiste en comparar las fuerzas tendentes al movimiento con las fuerzas resistentes que se oponen al mismo a lo largo de una determinada superficie de rotura. Se basa en la selección de una superficie teórica de rotura en el talud, el criterio de rotura de Mohr-Coulomb y la definición de un factor de seguridad (Sanhueza & Rodríguez, 2012).

Este tipo de análisis requiere información sobre la resistencia del suelo, pero no se requiere información sobre la relación esfuerzo-deformación ya que no se toman en cuenta las deformaciones. El sistema de equilibrio límite en dos dimensiones supone que, en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla, equivalentes a un factor de seguridad de 1,0. Un valor del factor de seguridad mayor que 1,0 indica excedencia de demanda y el talud es estable con respecto a la superficie de falla. Un factor de seguridad menor que 1,0 indica que el talud es inestable y un valor igual a 1,0 significa que el talud presenta falla inminente.

El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. Cada día se mejoran los sistemas de dovelas que fueron desarrollados a inicios del siglo XX y existen programas sencillos de utilizar. Generalmente, los métodos son de iteración y cada uno de los métodos posee un cierto grado de precisión (Suarez, 1998).

Existe una subdivisión para los métodos de equilibrio límite en función de la exactitud de los resultados, donde es posible encontrar el grupo de los métodos exactos y el de los no exactos. En el grupo de los métodos exactos, las leyes de la estática entregan una solución exacta dada la geometría sencilla que tiene la masa de suelo que falla, por lo que allí se encuadran los cálculos realizados para roturas del tipo plano y rotura por cuñas, haciendo la salvedad de las simplificaciones propias de todos los métodos de equilibrio límite, como la ausencia de deformaciones y el factor de seguridad constante en toda la superficie de rotura. Por otro lado, en el grupo de los métodos no exactos, las soluciones de la estática no son suficientes y el problema se vuelve hiperestático, debiendo recurrir entonces a una hipótesis inicial o a alguna simplificación para resolverlo (Sanhueza & Rodríguez, 2012). En este tipo de casos se incluyen las roturas circulares que corresponden a las consideradas en el presente estudio.

Dentro de los métodos no exactos se encuentran aquellos que consideran completa la masa de suelo que desliza, como un todo, que son conocidos como métodos de estabilidad global de la masa de terreno y aquellos que dividen la masa deslizante en fracciones más pequeñas para simplificar el análisis, que se denominan métodos de las dovelas.

El método de las dovelas se clasifica en métodos precisos (teorías de Morgenstern-Price, Spencer y Bishop riguroso) y en métodos aproximados (Janbu, Fellenius y Bishop simplificado) (Sanhueza & Rodríguez, 2012). Para el presente estudio, se utilizó el método de las dovelas, considerando las teorías de Morgenstern-Price.

En la figura 2.20 se muestran algunos ejemplos de los métodos de análisis universalmente conocidos para el cálculo del factor de seguridad.

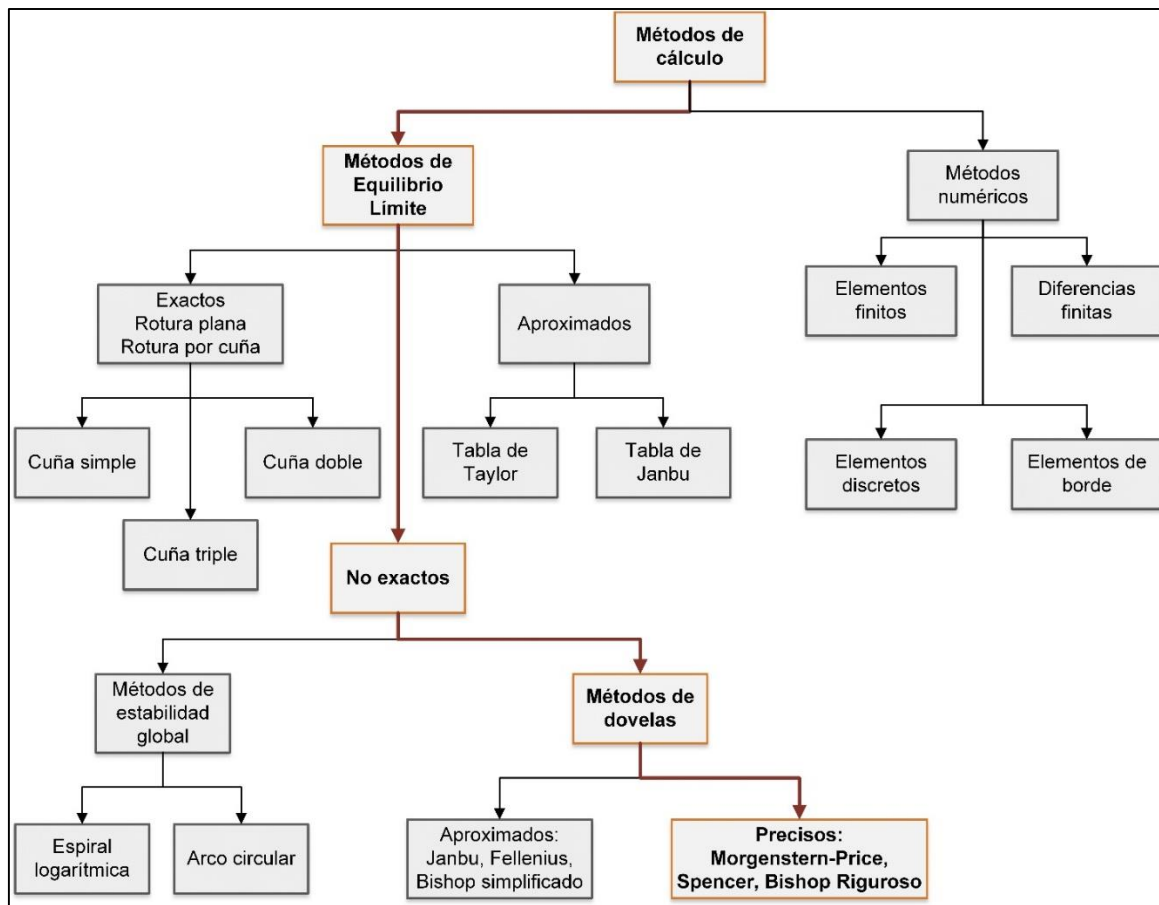


Figura 2.20. Ejemplos de métodos de análisis de estabilidad de taludes

Fuente: Suarez (1998)

Para determinar si una ladera o talud es estable bajo las condiciones que prevalecen en un determinado sitio, generalmente se utiliza el término factor de seguridad.

Según Sánchez (2009), el factor de seguridad es empleado para conocer cuál es el factor de amenaza con el cual el talud falla en las condiciones de comportamiento para el cual se diseña. Fellenius (1927) presentó el factor de seguridad como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla:

$$F.S. = \frac{\text{Resistencia al corte}}{\text{Esfuerzo al cortante}}$$

En superficies circulares donde existe un centro de giro y momentos resistentes y actuantes:

$$F.S. = \frac{\text{Momento resistente}}{\text{Momento actuante}}$$

Existen, además, según Suarez (1998), otros sistemas para definir el factor de seguridad, tales como la relación de altura crítica y altura real del talud y el método probabilístico.

Se estudia un cuerpo libre en equilibrio, partiendo de las fuerzas actuantes y de las fuerzas resistentes que se requieren para producir el equilibrio. Una vez calculada esta fuerza resistente, se compara con la disponible del suelo o roca y se obtiene una indicación del factor de seguridad.

Otra manera es dividir la masa que se estudia en una serie de dovelas y considerar el equilibrio de cada dovela por separado. Una vez realizado el análisis de cada dovela, se analizan las condiciones de equilibrio de la sumatoria de fuerzas o de momentos.

$$F.S. = \frac{\Sigma \text{Resistencias al corte}}{\Sigma \text{Esfuerzos al cortante}}$$

2.9.2. Selección del factor de seguridad

Una decisión crucial es escoger el factor de seguridad para las obras de ingeniería que se proyectan. Diversos autores proponen diferentes factores de seguridad para ser considerados en los diseños; para mencionar algunos ejemplos, en el caso de taludes, Sánchez (2009), recomienda los siguientes factores de seguridad mínimos, que se muestran en el cuadro 2.5, como una idea general a emplear para un diseño en el cual se toman en cuenta sistemas de prevención para disminuir el riesgo de deslizamiento.

Cuadro 2.5. Criterios para seleccionar un factor de seguridad para diseño de taludes

Caso	Factor de seguridad
Si puede ocurrir la pérdida de vidas humanas al fallar el talud.	1,7
Si la falla puede producir la pérdida de más del 30% de la inversión de la obra específica o pérdidas consideradas importantes.	1,5
Si se pueden producir pérdidas económicas no muy importantes.	1,3
Si la falla del talud no causa daños.	1,2

Fuente: Sánchez (2009)

Desde un enfoque de vulnerabilidad geotécnica, la reducción de ésta en los terraplenes de carretera de montaña implica necesariamente el aumento del factor de seguridad para alcanzar la estabilidad. En el cuadro 2.6 se muestran los factores de seguridad con base en diversos criterios (Ulloa & Vargas, 2007).

Cuadro 2.6. Intervalos de FS y criterios de vulnerabilidad

Factor de seguridad, FS	Criterio	Color
1,0 < FS < 1,25	Vulnerab. muy alta	Rojo
1,25 < FS < 1,5	Vulnerab. alta	Naranja
1,5 < FS < 2,0	Vulnerab. moderada	Amarillo
2,0 < FS < 3,0	Vulnerab. baja	Verde
FS > 3,0	Vulnerab. muy baja	Azul

Fuente: Ulloa & Vargas (2007)

Otros autores, como Oliva (2015), mencionan de manera general que en laderas y taludes suelen utilizarse valores de factor de seguridad entre 1,2 y 1,5.

Informes de la FHWA establecen un factor de seguridad mínimo de 1,25 para taludes en carreteras (Samtani & Nowatzki, 2006).

Según USACE (2003) y Duncan et al., (2014) para la condición de análisis a largo plazo se recomienda un factor seguridad mínimo igual a 1,5.

En el caso específico de Costa Rica, el CCCR (2009) establece los factores de seguridad mínimos para distintos aspectos geotécnicos. En el cuadro 2.7 se hace un resumen de aquellos aplicables en esta investigación.

Cuadro 2.7. Factores de reducción y seguridad para distintos aspectos geotécnicos

Elemento	Concepto	FS mínimo
Excavaciones a cielo abierto	Falla del talud	1,5 (estático)
		1,3 (pseudoestático)
	Falla de fondo	2,5
	Falla por subpresión	2,0
	Falla por gradientes de filtración	3,0

Fuente: ACG. (2009)

En el *Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica* (2015), se presenta un nuevo esquema para determinar el factor de seguridad. En contraste con el CCCR (2009), para la escogencia del factor de seguridad, se agrega el nivel de riesgo contra pérdida de vidas humanas y contra daños económicos y ambientales, tanto para taludes permanentes como para taludes temporales. Existe una diferencia con respecto a los valores que se utilizaban previo a la publicación del nuevo código, dado que, al incorporar el factor riesgo, se cuenta con una serie de factores diferentes para cada nivel de riesgo, y llama la atención el factor de seguridad para la condición pseudoestática, donde el valor máximo es de 1,10, que es menor al valor de 1,30 que se establece en el CCCR (2009). De modo que la condición por sismo actual es menos crítica en los análisis, dado que a lo largo de la historia los deslizamientos se presentan sobre todo en la época lluviosa (Monge et al., 1995).

El *Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica* (2015) recomienda los factores mínimos que se muestran en el cuadro 2.8.

Cuadro 2.8. Factores de seguridad para el diseño de taludes permanentes y análisis de laderas

Condición de análisis	Riesgo de pérdida de vidas Riesgo de daños económicos y ambientales		Bajo	Medio	Alto
Estática	Bajo		1,20	1,30	1,40
	Medio		1,30	1,40	1,50
	Alto		1,40	1,50	1,50
Pseudoestática: Coeficiente pseudoestático según el artículo 2,5	Bajo		>1,00	>1,00	1,05
	Medio		>1,00	1,05	1,10
	Alto		1,05	1,10	1,10
Desembalse rápido: Taludes en embalses con posibilidad de desembalse rápido	Bajo		1,10	1,15	1,20
	Medio		1,15	1,20	1,30
	Alto		1,20	1,30	1,40

Fuente: ACG (2015)

Si una vez calculado el factor de seguridad, se comprueba que el talud no es estable, entonces será necesario colocar algún sistema que estabilice el talud y posteriormente se deberá calcular un nuevo factor de seguridad.

2.9.3. Métodos de dovelas

En la mayoría de los métodos con fallas curvas o circulares, la masa de la parte superior de la superficie de falla se divide en una serie de rebanadas verticales. El número de rebanadas depende de la geometría del talud y de la precisión requerida para el análisis. Mientras mayor sea el número de rebanadas, se supone que los resultados serán más precisos. Dependiendo del método de análisis que se utilice en los procedimientos de análisis con rebanadas, generalmente se considera el equilibrio de momentos con relación al centro del círculo para todas y cada una de las rebanadas como se muestra en la figura 2.21.

Entre los diversos métodos que utilizan dovelas existen algunas diferencias, especialmente en lo referente a las fuerzas que actúan sobre las paredes laterales de las tajadas como se aprecia en la figura 2.22. El método ordinario, o de Fellenius, no tiene en cuenta las fuerzas entre dovelas. El método simplificado de Bishop supone que las fuerzas laterales entre dovelas son horizontales y desprecia las fuerzas de cortante, y otros métodos más precisos, como los de Morgenstern y Price, utilizan una función para calcular las fuerzas entre dovelas.

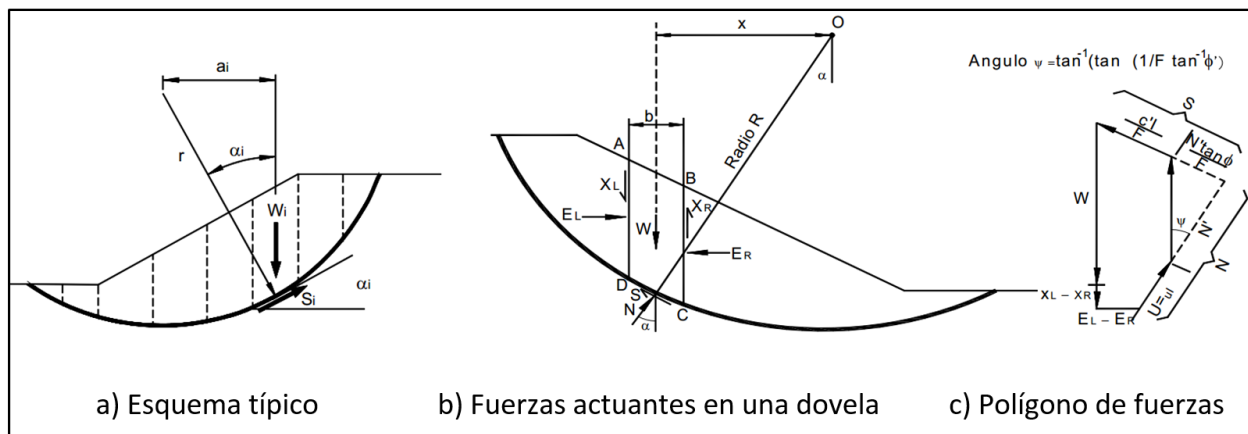


Figura 2.21. Esquema del sistema de análisis con dovelas
Fuente: Suarez (1998)

El método de Morgenstern y Price (1965) supone que existe una función que relaciona las fuerzas de cortante y las fuerzas normales entre dovelas. Esta función puede considerarse constante, como en el caso del método de Spencer, o puede considerarse otro tipo de función. La posibilidad de suponer una determinada función para calcular los valores de las fuerzas entre dovelas, lo hace un método más riguroso que el de Spencer. Sin embargo, esta suposición de funciones diferentes tiene muy poco efecto sobre el cálculo del factor de seguridad cuando se satisface el equilibrio estático y hay muy poca diferencia entre los resultados del método de Spencer y el de Morgenstern y Price. El método de Morgenstern y Price, al igual que el de Spencer, es un método muy preciso, prácticamente aplicable a todas las geometrías y perfiles de suelo (Suarez, 1998).

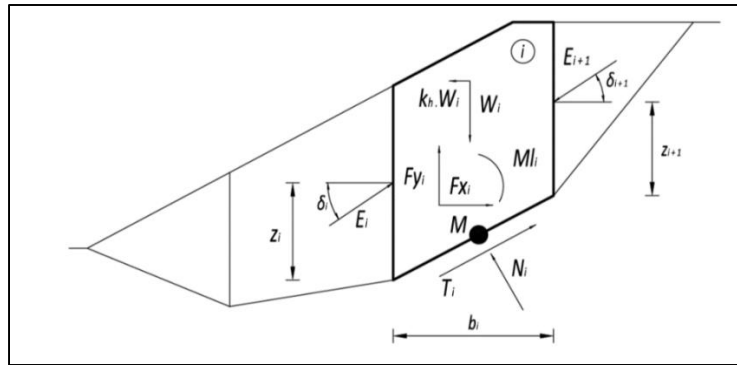


Figura 2.22. Esquema estático del método Morgenstern y Price
Fuente: Espinoza & Tapia (2013)

De acuerdo con la figura 2.23, los siguientes supuestos se introducen en el método Morgenstern y Price para calcular el equilibrio límite de las fuerzas y momento de los bloques individuales (Espinoza & Tapia, 2013):

Los planos divididos entre bloques son siempre verticales:

- La línea de acción de peso del bloque W_i pasa por el centro del segmento *iésimo* de la superficie de deslizamiento representada por el punto M.
- La fuerza normal N_i actúa en el centro del segmento *i* de la superficie de deslizamiento, en el punto M.
- La inclinación de las fuerzas E_i que actúan entre los bloques es diferente en cada bloque (δ_i) al punto extremo de la superficie de deslizamiento $\delta = 0$.

El método de Fellenius y el de Bishop, al ser casos extremos de análisis, son útiles en función de las condiciones del terreno, pero para un estudio más complejo se pueden usar los de Janbu y Morgenstern y Price para un conocimiento más profundo de la superficie de falla.

A diferencia del método de Spencer, que asume inclinaciones constantes para las fuerzas entre dovelas, la situación planteada por Morgenstern y Price asume que los valores de estas inclinaciones varían sistemáticamente a través de la masa deslizada (Ramírez & Salcedo, 2006).

El método de Morgenstern y Price presenta diversas ventajas con respecto a los otros métodos: es más robusto, el análisis es más completo, presenta mejor convergencia y se logran factores de seguridad más precisos que los calculados con otros métodos. Además, de la experiencia en trabajos realizados, se afirma que este método es uno de los métodos que más se acerca a la realidad (Espinoza & Tapia, 2013); por lo que se decidió que fuese éste el método que se utilice para el análisis de los taludes en estudio.

2.9.4. Grietas de tensión en los análisis de estabilidad

Una grieta de tensión se introduce en los análisis de estabilidad de taludes, considerando la terminación de la superficie de deslizamiento en el borde de una rebanada a una profundidad apropiada por debajo de la superficie del suelo. En muchos casos, las grietas de tensión no tienen efecto significativo en el cálculo del factor de seguridad; sin embargo, una razón para introducir grietas de tensión es eliminar problemas de estabilidad numéricos y esfuerzos negativos inapropiados. Se considera buena práctica considerarlas cuando hay presencia de suelos cohesivos a lo largo de la porción superior de la superficie de deslizamiento (Duncan et al., 2014).

En los suelos cohesivos, las grietas de tensión tienden a formarse cerca de la parte superior del talud a medida que se desarrolla la condición de equilibrio límite (y falla). El desarrollo del círculo de deslizamiento

termina en la parte inferior de la grieta de tensión. En la grieta de tensión no puede desarrollarse una resistencia al corte, pero si se llena de agua habrá que tomar en cuenta la fuerza de presión hidrostática que actúa en dirección horizontal (Oporto, 2006).

De acuerdo con Baker (1981), las grietas de tensión siempre se encuentran en la cresta de los taludes de suelo o roca. La existencia de estas grietas indica que en una cierta zona el esfuerzo de tracción excede la resistencia a la tracción del medio. Las grietas de tensión afectan la estabilidad del talud en varias maneras:

1. disminuyen la longitud de la superficie de deslizamiento, de modo que se reduce la resistencia a la falla;
2. la presión de agua que actúa en la grieta constituye una fuerza motriz adicional que contribuye a la falla y
3. el agua en la grieta tiende a suavizar el suelo, degradando sus propiedades de resistencia.

Se requiere entonces predecir la profundidad a la cual las grietas penetrarán y estimar el efecto que tendrán sobre la estabilidad. Particularmente, es de interés determinar las condiciones bajo las cuales se espera que no haya grietas de tensión, lo que evita el efecto suavizante que es difícil de cuantificar, ya que la determinación de la profundidad de la grieta de tensión sigue siendo un eslabón débil en los cálculos de estabilidad de taludes. Por otra parte, cuando la profundidad de la grieta se conoce, no es difícil tomar en cuenta su efecto en el análisis de estabilidad.

Es costumbre estimar la profundidad de la grieta de tensión utilizando la ecuación (2.13), basada en la teoría de Rankine del empuje de suelo:

$$z_c = \frac{2c'_m}{\gamma} \tan \left(45 + \frac{\phi'_m}{2} \right) \quad (2.13)$$

Donde:

- z_c = profundidad de la grieta de tensión,
- c'_m = cohesión movilizada igual a c/F en términos de esfuerzos efectivos,
- γ = peso unitario del suelo,
- ϕ'_m = ángulo de fricción movilizado igual a ϕ/F en términos de esfuerzos efectivos y
- F = factor de seguridad.

Sin embargo, la ecuación (2.13) es aplicable cuando se asume un estado de Rankine activo y únicamente a suelos homogéneos, no toma en cuenta la geometría del talud, presiones de poro y el factor de seguridad (Telford, 1991)

Una aproximación sistemática en la consideración de las grietas de tensión en el análisis de taludes con equilibrio límite fue propuesto y desarrollado por Spencer (1973), quien modificó la ecuación clásica de la profundidad de la grieta de tensión de acuerdo con la ecuación (2.14) (Telford, 1991).

$$D_t = \frac{2c'_m}{\gamma(1 - r_u)} \tan \left(45 + \frac{\phi'_m}{2} \right) \quad (2.14)$$

Donde:

- D_t = Profundidad de la grieta de tensión,
- r_u = coeficiente de presión de poro, $r_u = \mu/\gamma z$,
- μ = presión de poro y
- z = espesor de cada capa de suelo suprayacente.

2.9.5. Cargas sísmicas

Los sismos afectan la estabilidad de los taludes en dos formas: la aceleración producida por el movimiento del suelo durante el sismo somete al suelo a fuerzas cíclicas y las tensiones cíclicas inducidas por la carga sísmica pueden causar reducción en la resistencia al cortante del suelo. Si la resistencia del suelo se reduce en menos del 15% por acción de la carga sísmica, se puede hacer un análisis pseudoestático de estabilidad del talud. En el análisis pseudoestático, el efecto del sismo se representa aplicando una fuerza horizontal a la masa potencialmente deslizante igual al peso del suelo multiplicado por un coeficiente sísmico, el cual es utilizado en el análisis de estabilidad de taludes con equilibrio límite (Duncan et al., 2014).

Si la resistencia del suelo se reduce más del 15% como resultado de las cargas cíclicas, se necesita realizar el análisis dinámico para estimar las deformaciones resultantes producto de los sismos. Hay los que aplican este tipo de análisis para todos los taludes, aun cuando la reducción en la resistencia debido a carga sísmica es menos del 15%. Debido a que las cargas sísmicas son de corta duración, es razonable considerar que el suelo no drenará durante el movimiento sísmico. Según Duncan et al. (2014), en taludes existentes donde se ha alcanzado el equilibrio por consolidación, resulta conveniente evaluar la resistencia al corte con un procedimiento de ensayo no consolidado y no drenado (UU); sin embargo, en taludes nuevos es necesario simular el efecto de la consolidación o el hinchamiento, por lo que resulta más conveniente la ejecución de ensayos de resistencia tipo consolidado y no drenado (CU).

Considerar la hipótesis no drenada con un ensayo tipo UU es de especial importancia en taludes naturales constituidos por suelos finos con plasticidad, como los que predominan en gran parte del territorio costarricense y que es objeto de estudio en la presente investigación.

Para el análisis dinámico, el *Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica* (ACG, 2015) recomienda utilizar los datos del cuadro 2.9. Cabe resaltar que este nuevo código, recientemente presentado por la Asociación Costarricense de Geotecnia (ACG) en agosto del año 2015 y publicado en la Gaceta N° 208 del 27 de octubre del 2015, mantiene los mismos valores de coeficientes dinámicos establecidos en el CCCR (ACG, 2009), con un período de retorno de 475 años.

Cuadro 2.9. Coeficientes pseudoestáticos horizontales para distintos tipos de suelo y según el tipo de zona sísmica

Tipo de suelo	Zona II	Zona III	Zona IV
S1	0,15	0,15	0,20
S2	0,15	0,20	0,20
S3	0,15	0,20	0,25
S4	0,15	0,20	0,25

Fuente: ACG (2015)

Para el caso de los taludes en estudio, de acuerdo con el *Código Sísmico de Costa Rica* (CSCR) (CFIA, 2010), toda la RN No. 856 se encuentra en la zona II, por lo que, de acuerdo con el cuadro 2.9, se debe utilizar el factor 0,15.

2.10. Modelado de taludes

Con el desarrollo de las ciencias informáticas y la evolución de la computación, a lo largo de los años, se han ido implementando y perfeccionando diversos programas que permiten el cálculo de las estructuras con mayor exactitud y en el menor tiempo posible.

Para el cálculo riguroso que requiere este tema de estabilidad de taludes, se decide hacer uso de las computadoras para resolver los problemas. Son numerosas las aplicaciones informáticas existentes en el mercado capaces de resolver la estabilidad de un talud frente al deslizamiento, así como simular cargas externas, existencia de agua o terremotos.

Actualmente, para la ejecución de cálculos en taludes, existen una serie de programas que permite obtener diferentes resultados, entre los que se encuentran los paquetes de GEO-SLOPE International, Ltd, como el GeoStudio que contiene el SIGMA/W®, SEEP/W® y el SLOPE/W®, entre otros; existen otros programas como Plaxis 3D® de la Compañía PLAXIS, el Abaqus® de la Compañía *Dassault Systèmes*, el STB 2001® por Arnold Verruijt, el SLIDE®, el Rocfall® y el RS² (Phase2 9.0) de la Compañía RocScience, el PISA® de *Pisa Software for geotechnical engineers*, el programa Estabilidad de taludes del paquete GEO5 *Software Geotécnico* de la compañía Fine, el programa FLAC® de *ITASCA Consulting Group, Inc.*, ZSOIL.PC® de *Zace Services Ltd*, el Rotomap® de *PASI Geophysical instruments*, el SVSLOPE® de *Soilvision Systems LTD*, el RAMMS® de *Rapid Mass Movements*, entre otros.

El programa Plaxis 3D® es un paquete de elementos finitos destinado al análisis tridimensional de la deformación y la estabilidad en la ingeniería geotécnica. Está equipado con características para hacer frente a diversos aspectos de las estructuras geotécnicas complejas y procesos constructivos utilizando procedimientos computacionales robustos y teóricos. Se puede definir geometrías complejas y en dos modos diferentes. Estos modos se definen específicamente para suelo o modelado estructural (Ramírez & Salcedo, 2006).

El programa SLOPE/W® evalúa el factor de seguridad para satisfacer las fuerzas y momentos de equilibrio (Revelo, 2008). El programa utiliza una interfaz gráfica que permite a los usuarios generar rápidamente un modelo geométrico basado en una sección transversal vertical representativa del problema que se trate. El manejo del programa implica ingresar los parámetros geométricos y geotécnicos del suelo (Quezada, 2013).

Se han comparado los programas STB 2001® y SLOPE/W® y se ha determinado que el ingreso de datos del SLOPE/W® es más completo. Para la visualización de resultados, el SLOPE/W® es mucho más potente que el STB2001®, y el SLOPE/W® tiene mejor capacidad de manipulación, debido a que fue realizado para trabajar sobre el sistema operativo Windows (De Matteis, 2003).

El programa SLOPE/W® utiliza la teoría del equilibrio límite para el cálculo del factor de seguridad en los taludes de tierra y roca. La exhaustiva formulación del programa hace fácilmente posible el análisis de los problemas de estabilidad usando varios métodos de cálculo. Tiene habilitados modelos de suelos heterogéneos, complejos estratigráficos y combinaciones de superficies geométricas, usando una amplia selección de modelos de suelos.

Una vez que se resuelve un problema de estabilidad de taludes, el SLOPE/W® ofrece muchas herramientas para visualizar los resultados, se pueden destacar las que permiten ver información de la superficie de falla crítica, de la masa deslizante total, diagramas de cuerpo libre y un polígono de fuerzas que muestra las fuerzas que actúan en cada dovela. En general, su interfase permite un manejo fácil y la visualización del problema de una manera sencilla.

2.11. Calibración del modelo: concepción general del modelado en la ingeniería civil

Para el análisis de problemas ingenieriles de alta complejidad se ha utilizado una metodología única, donde se combinan de forma creativa distintas formas de instrumentación de las estructuras y el terreno con la simulación y el modelado numérico, con el objetivo de obtener un modelo calibrado de la obra de ingeniería y, con éste, poder estudiar la misma bajo distintas condiciones y, así, disponer de una visión lo más real posible de su comportamiento.

El método de investigación más general, aplicable a todas las ramas del saber, es el modelado. Su eficacia ha sido probada a través de la historia, desde la modelación física, introducida por los sabios de la Edad Media, hasta el modelado matemático, utilizado por los científicos de la Era Moderna.

Un modelo matemático tiene que someterse a un proceso de calibración física como vía para demostrar su fiabilidad y correspondencia con el fenómeno físico que se estudia. Por esto es que resulta necesario efectuar el proceso de calibración física.

La calibración de un modelo geotécnico consiste en analizar la morfología antes de la falla del talud por medio de observaciones de campo, en caso de que exista falla, ya que no siempre el talud está fallado. Se deben realizar ajustes sucesivos del modelo, estudiar las propiedades de los materiales y representar los taludes en el programa, de modo que el modelo brinde una respuesta que va a depender de cuán bien caracterizados estén los materiales y de cuán preciso estuvo el modelo espacialmente. El objetivo de la calibración es lograr reproducir lo que está sucediendo en el talud, de modo que se puedan determinar las posibles causas del deslizamiento, es decir, la configuración de la superficie de falla del deslizamiento relativo a la topografía en el instante en que ocurrió la falla.

La calibración necesita disponer de ensayos reales (ensayos de laboratorio, ensayos a escala, ensayos *in situ* o instrumentación de la obra de ingeniería) como contraste para demostrar la fiabilidad y correspondencia entre el problema real estudiado y el modelo. El ensayo físico aporta variables de control y curvas de comportamiento, que son los patrones de calibración de los modelos numéricos. Los factores (modelo geométrico, modelos de cargas, modelos del material) que definen el modelo y, específicamente, las variables que los caracterizan, pueden ser obtenidos por métodos determinísticos o por métodos aleatorios como el estocástico.

Un método para realizar la calibración es el llamado “retrocálculo”, también conocido como “retroanálisis” en el cual se requiere determinar la configuración de la superficie de falla del deslizamiento relativa a la topografía en el instante en que ocurrió la falla, como el perfil estratigráfico del suelo a lo largo de la superficie de falla, niveles freáticos y densidad del suelo. Con esta información se implementa el modelo en el programa y se ajustan los parámetros de resistencia al cortante del suelo hasta obtener un factor de seguridad de 1,0, que indica que el talud se encuentra en el límite entre la estabilidad y la inestabilidad, y habrá fallado (Chaparro & Vargas, 2012). Para este estudio se modela mediante el método de Morgenstern-Price.

Este análisis de retro-cálculo, como análisis retrospectivo de fallas de taludes, es un método efectivo que incorpora importantes factores que muchas veces no son bien representados en ensayos de laboratorio, tales como la no homogeneidad, la influencia de fisuras en la resistencia al corte y el efecto de los planos de debilidad dentro de la masa de suelo. Si existen diferencias entre las resistencias al cortante residuales del laboratorio y las resistencias del análisis retrospectivo, se usará este último, ya que es un valor más confiable en el diseño de las obras de estabilización; sin embargo, la confiabilidad depende del modelo (Alva, 1994).

Los valores obtenidos del retrocálculo pueden ser empleados para el análisis de la estabilidad en pendientes que poseen características similares o que están ubicadas en la misma región (Bojorque, 2010).

Para que los resultados que se obtienen con este método sean compatibles con las propiedades del suelo en el momento de la falla, se debe tener criterio y experiencia para estimar algunos parámetros en el análisis, como el peso unitario del suelo, las presiones de poro, la geometría original del talud y la estructura del suelo, así como la sensibilidad del resultado luego de los valores elegidos (Arellano, Bielefeldt & Correa, 2012).

De acuerdo con Arellano et al. (2012), existen varios métodos para obtener los parámetros de resistencia del suelo mediante análisis retrospectivo, algunos de los cuales se describen brevemente a continuación:

- Métodos propuestos por Laurence D. Wesley and Viraja Leelaratman

Estos métodos consideran la geometría de la superficie de falla para determinar los parámetros de resistencia.

Método 1: El primer método corresponde a una combinación de los parámetros de corte del suelo, para un $FS=1$, tanto para una superficie específica de falla como para el talud intacto (talud de diseño). Se realiza un análisis convencional con el que se obtienen los valores de c' y $\tan\phi'$ que cumplan con el criterio de falla, donde el FS sea igual a la unidad. El intervalo de valores se obtiene del programa a partir de un centro de

radio estimado de la superficie de falla. Se repite el análisis y se obtienen nuevas combinaciones de c' y ϕ' que se aplican al talud intacto. De modo que el punto de intersección de las curvas define el par c' , $\tan\phi'$ aplicados al terreno.

Método 2: El segundo método consiste en obtener un gráfico FS vs c' o $\tan\phi'$. En este caso se obtiene un factor de seguridad inferior a la unidad, a excepción del caso cuando el círculo de falla crítico corresponde al círculo de falla real. Posteriormente se toman las combinaciones de c' y ϕ' obtenidos del análisis retrospectivo del talud intacto y se utilizan para calcular los FS para el círculo de falla real, obteniéndose factores de seguridad mayores que la unidad. De modo que el punto de intersección de los valores c' y $\tan\phi'$ define los parámetros de resistencia del suelo (Arellano et al., 2012).

- Método de Duncan

Según Duncan et al. (2014), se puede realizar el retrocálculo manteniendo constante uno de los parámetros de resistencia al cortante (c o ϕ), ya sea porque se asume, o porque se conoce mediante algún método de ensayo realizado, y por medio del retrocálculo hallar el valor del otro parámetro de resistencia al cortante, hasta lograr el factor de seguridad igual a la unidad, siempre y cuando se cuente con la geometría del talud y con los pesos unitarios. En este caso, solamente un parámetro de resistencia al cortante desconocido puede ser calculado utilizando el retrocálculo.

Con respecto al retrocálculo de los parámetros de resistencia al cortante basado en la geometría de la superficie de deslizamiento, Arellano et al. (2012) menciona que, aunque para cualquier talud dado existe un número infinito de pares de valores c' y ϕ' que produce un FS igual a 1, también se producirá para cada par de valores una superficie de deslizamiento crítica. Cada conjunto de parámetros de resistencia al esfuerzo de corte produce un factor de seguridad de 1, pero la superficie de deslizamiento crítica es diferente.

Debido a que cada par de parámetros de resistencia al cortante (c , ϕ) corresponde a una superficie de deslizamiento única, la ubicación de la superficie de deslizamiento, aunado al conocimiento de que el talud ha fallado, puede ser utilizada para retrocalcular valores para los dos parámetros de resistencia al cortante (c , ϕ).

El retro cálculo del ángulo de fricción y la cohesión por medio de comparación entre la superficie de deslizamiento calculada contra la superficie de deslizamiento real ha tenido un éxito limitado y debe ser utilizado cuidadosamente. En muchos casos se ha tenido gran éxito haciendo uso de información adicional, como correlaciones donde se estime uno de los valores de los parámetros de resistencia al cortante, y posteriormente, retrocalcular el otro valor (Duncan et al., 2014).

Para un talud homogéneo, la profundidad de la superficie de deslizamiento está relacionada con el parámetro adimensional $\lambda_{c, \phi}$, definido por la ecuación (2.15).

$$\lambda_{c, \phi} = \frac{\gamma H \tan \phi}{c} \quad (2.15)$$

Donde:

λ = parámetro adimensional,

γ = peso unitario del material,

H = altura del talud,

ϕ = ángulo de fricción del material, en términos de esfuerzos totales o efectivos y

c = cohesión del material, en términos de esfuerzos totales o efectivos.

Los siguientes son los pasos para retrocalcular los parámetros de resistencia al cortante y localizar la superficie de deslizamiento, de acuerdo con el procedimiento de Duncan et al. (2014):

1. Se asume una serie de valores pares de c' y ϕ' . Los pares de valores son escogidos de tal manera que representen un rango en el parámetro adimensional $\lambda_{c,\phi}$, pero los valores no necesariamente generan un factor de seguridad igual a 1.
2. Los círculos de falla críticos y los correspondientes factores de seguridad mínimos se calculan para cada par de valores de los parámetros de resistencia.
3. Los valores de los parámetros de resistencia al cortante desarrollados (c'_d y ϕ'_d) se calculan para cada par de parámetros de resistencia de las ecuaciones (2.16) y (2.17), utilizando la cohesión y la fricción asumidas, así como el factor de seguridad calculado.

$$c'_d = \frac{c'}{FS} \quad (2.16)$$

$$\phi'_d = \arctan \frac{\tan \phi'}{FS} \quad (2.17)$$

El ángulo de fricción y la cohesión desarrollados representan los valores retrocalculados requeridos para producir un factor de seguridad igual a 1.

4. Se calcula la profundidad de la superficie de deslizamiento crítica para cada par de valores de parámetros de resistencia.
5. Los valores retrocalculados de cohesión y ángulo de fricción en el paso 3 se grafican versus la profundidad de la superficie de deslizamiento, calculada en el paso 4.
6. De los gráficos realizados, se determinan los valores de la cohesión y el ángulo de fricción correspondientes a la profundidad de la superficie de deslizamiento observada, dada por $\lambda_{c,\phi}$.

- Método de los taludes intactos

También es posible obtener los parámetros de resistencia del suelo analizando taludes que no han fallado, lo que si bien disminuye la certeza de los parámetros encontrados, nos permite saber el intervalo donde se encuentran. Una alternativa es recolectar datos de un gran número de pendientes y alturas de taludes para una formación geológica o tipo de suelo en particular, que sea relativamente homogéneo, para estimar valores de c y ϕ (Arellano et al., 2012).

Para efectos de los taludes objeto de estudio, se utiliza el retro-cálculo mediante un proceso iterativo para obtener los parámetros geotécnicos resistentes del suelo en el momento de la falla correspondiente con un $FS=1$ (Chaparro & Vargas, 2012). Igualmente, se aplica lo que establece el *Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica* (2015), en cuanto a que en taludes o laderas donde ya han sucedido o están ocurriendo deslizamientos y existe información suficiente, es posible y conveniente realizar retrocálculo con el fin de estimar los parámetros de resistencia representativos a lo largo del plano de falla, considerando que el factor de seguridad debe ser igual a la unidad (1,0) y los parámetros que resulten de este método deben ser tomados en cuenta en el diseño de las soluciones (ACG, 2015).

2.12. Propuestas de solución

Las propuestas de solución se refieren a los métodos de estabilización de taludes y deslizamientos, entre ellos se pueden mencionar trabajos de excavación, drenajes, estructuras de retención y técnicas especiales. Existen diferentes autores que proponen soluciones para estabilizar los taludes. Teniendo claro las causas

que generan la inestabilidad del talud mediante el proceso de calibración realizado, se proponen soluciones que dependen de las condiciones presentes en los taludes, considerando para ello el tipo de corrección más adecuado, dado que, para lograr la estabilidad del talud, puede ser que la solución sea geométrica, o bien, sea necesaria la construcción de estructuras de retención, en conjunto con trabajos para controlar la erosión, o hacer uso de técnicas especiales de estabilización.

En el cuadro 2.10 se muestra una recopilación a manera de matriz de información proveniente de varios autores tales como Alva (2011), ACG (2015), Candela (2012), García & Chávez (2007), Grases, Contreras & Grases (1997), IGME (1986) y Ortuño (2010); con la síntesis de las diferentes propuestas de estabilización que se pueden aplicar a los taludes. Se debe destacar que las propuestas son similares entre los distintos autores y que algunos de los casos planteados son aplicables a los taludes en estudio. Algunas propuestas, como la construcción de bermas, revegetación, obras de drenaje, corrección por geometría, tendido del talud, obras de excavación en las laderas para descargar en talud, protección con biomantas o siembra de taludes, son posibles en sitios donde se tiene disponibilidad de espacio. Es importante dejar claro que se deben analizar las soluciones que satisfagan las condiciones de estabilidad de acuerdo al modelo geotécnico analizado.

Cuadro 2.10. Propuestas de varios autores para la solución a la inestabilidad de taludes.

Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica (2015)	García & Chávez (2007)	Instituto Geológico y Minero de España (1986)	Alva (2011)	Candela (2012)	Grases & Contreras (1997)	Ortuño & Murillo (2010)
Movimientos de tierra Inclusión de bermas, rellenos al pie y escolleras, remoción de material de la corona, remoción de bloques inestables.	Estabilización Geometría: bermas impermeabilizadas con suelo cemento, hormigón proyectado	Corrección por geometría Eliminación de la masa inestable, descabezamiento, construcción de tacones de escollera, construcción de bermas.	Excavación Reducción de la altura del talud excavando en la parte superior. Tendido del ángulo del talud. Construcción de bermas.	Excavación Desmonte de tierras de la ladera para descargar el talud.	Geometría Disminución de pendiente, reducción de la altura, colocación de material en el pie proveniente de las partes superiores del talud.	
Drenaje Drenaje superficial Subdrenaje Drenaje profundo	Drenaje Cunetas de coronación y canales	Corrección por drenaje <i>Superficial:</i> mediante zanjas de drenaje <i>Profundo:</i> mediante drenes horizontales, pozos verticales, galerías de drenaje y zanjas de relleno drenante	Drenaje Drenes horizontales Zanjas de subdrenaje. Pozos verticales perforados. Construcción de contracunetas. Siembra del talud.	Drenaje Zanjas de recogida de agua en la corona del talud. Pozos profundos con conexión entre ellos, drenes californianos.	Drenaje Subhorizontales, verticales, transversales o interceptores, drenajes de contrafuerte.	
Muros Muros rígidos: muros en voladizo, muros de gravedad, muros flexibles, muros de suelo reforzado		Corrección por elementos resistentes <i>Anclajes:</i> provisionales, permanentes, activos, pasivos, mixtos. <i>Muro:</i> de sostenimiento, de contención, de revestimiento, de gravedad, alijerados, de tierra armada, de apeo. <i>Pilote:</i> como sostenimiento y estabilización de movimientos existentes. <i>Muros de pantalla</i>	Contrafuerte de tierra o roca (o bermas de relleno) Excavación del deslizamiento y sustitución con relleno compactado. Bermas de relleno compactado en el pie.	Estructuras de retención Muros de gravedad, <i>soil nailing</i> , Pantallas o cortinas de pilotes, bareras de micropilotes	Soluciones estructurales Muros de gravedad, en cantiliver, muros de concreto proyectado atirantado, muros de gaviones	
Estructuras ancladas Estructuras enterradas: tablestacas, pilotes, pilas.			Estructuras de retención Muros: cantiliver, por gravedad, entibado, con tirantes, suelo reforzado, suelo clavado, de gaviones. Pilotes verticales vaciados in situ, y anclados, con la base cimentada por debajo del plano de falla Pernos de anclaje.			Pantallas de pilotes para utilizarse en laderas en las que se ha producido o se puedan producir deslizamientos traslacionales.
Revestimiento de taludes Barreras y estructura de impacto	Erosión Revegetación	Corrección superficial <i>Mallas de guido de piedra.</i> <i>Siembra de taludes:</i> evita la erosión y favorece el drenaje superficial <i>Hormigón proyectado:</i> evita la meteorización de roca y el deterioro progresivo así como desprendimientos.	Erosión Revestimiento con vegetación Protección con biomantas	Erosión Adiciones de cal, plantación de árboles		
			Técnicas especiales <i>Grouting</i> , inyección química, electroosmosis, congelamiento, calentamiento	Otras técnicas Columnas de <i>jet grouting</i> Implantación de muros ecológicos con material geotextil.		

Fuente: El autor

Conclusiones parciales

Se considera que el sistema más apropiado para clasificar los movimientos de taludes y laderas es el desarrollado por Varnes (1978), actualizado por el Transportation Research Board de los Estados Unidos (1996). Los diferentes elementos que intervienen en la clasificación han de ser considerados en los estudios y en los instrumentos de inspección de taludes en suelos y rocas blandas.

La caracterización de los suelos tropicales desarrollada por Suárez (1998) y sus consideraciones sobre los factores ambientales son de especial importancia para el caso de Costa Rica. En el caso de nuestro país, deben de ser considerados en los análisis de estabilidad de taludes en suelos y rocas blandas los efectos de la meteorización, la infiltración de agua y la saturación de los suelos en sus propiedades producto de periodos prolongados de intensas lluvias.

Los factores que influyen en la estabilidad de las laderas naturales, especialmente los causantes de la inestabilidad de los taludes, son ampliamente debatidos en la bibliografía sobre el tema y sintetizados en el trabajo para ser tomados como base de estos estudios. Una contribución importante en esta dirección son las regulaciones que establece al respecto el *Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica* (2015); sin embargo, muchos aspectos relativos a las investigaciones preliminares y detalladas de los taludes pueden ser objeto de mejoras a partir del análisis realizado.

Se constata que el modelo elastoplástico, tipo Mohr-Coulomb, es uno de los modelos más ampliamente conocidos y utilizados hasta el día de hoy y que se adapta perfectamente a la solución de problemas de estabilidad de taludes en suelos y rocas blandas.

En el contexto de Costa Rica es factible y, sigue siendo una tendencia en el ámbito internacional, el empleo de modelos de clasificación de macizos rocosos para evaluar rocas blandas y a partir de correlaciones establecer los parámetros de resistencia que caracterizan a un modelo Mohr-Coulomb. En la bibliografía internacional consultada se evidenció que las rocas blandas pueden ser perfectamente analizadas en términos de resistencia con un modelo Mohr-Coulomb.

Se constata la necesidad de determinar la resistencia al corte de los materiales en condiciones CD, CU y UU. La selección de una condición u otra depende de que el talud sea existente o nuevo “en proyecto” y del tipo de análisis a realizar que puede ser estático o pseudoestático. Además, deben ser consideradas diferentes variables o hipótesis que intervengan en el análisis estático y pseudoestático. En los análisis realizados se establece qué resistencia al corte es necesario utilizar en cada uno de los análisis.

Hasta el día de hoy, los métodos de equilibrio límite siguen siendo ampliamente utilizados en los análisis de estabilidad de taludes y han sido implementados en múltiples programas informáticos que viabilizan la solución. Entre estos programas destaca el GeoStudio, con su módulo SLOPE/W®, que recomienda en la solución por MEL el empleo del método Morgenstern – Price, para dar una respuesta más robusta.

En el caso de Costa Rica, al emplear el MEL, debe ser utilizado el sistema de factores de seguridad y de coeficientes sísmicos que establece el *Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica* (2015).

Para llevar a cabo un adecuado análisis de retrocálculo, se considera que los resultados de los ensayos de campo y de laboratorio constituyen un aporte fundamental para determinar los parámetros geotécnicos resistentes del suelo en el momento de la falla. Existen diversos métodos de retrocálculo con los cuales es posible resolver, conociendo previamente la superficie de falla, los problemas de remoción en masa con posterioridad a su ocurrencia.

El proceso de calibración, con ayuda de programas computacionales como el SLOPE/W®, es una vía para demostrar la fiabilidad y correspondencia de un modelo geotécnico con respecto a las condiciones físicas en estudio. Existen aportes de relevancia internacional en los cuales se manifiesta la importancia de disponer de la combinación entre el modelado y los ensayos de campo y laboratorio para garantizar un adecuado

proceso de calibración. Asimismo, el proceso de calibración da validez a los resultados que se utilizarán en el diseño de la solución de un determinado problema de inestabilidad en taludes.

Las medidas de estabilización o soluciones ingenieriles para resolver los problemas de estabilidad de taludes deben ser propuestas a partir del detallado conocimiento geotécnico de las propiedades del talud y de la correcta simulación o modelado de la estabilidad del mismo para las diferentes condiciones que intervienen en el diseño.

CAPÍTULO 3 . MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se explica cómo se realizó la investigación, cuáles fueron las etapas de recopilación de información, recorridos de campo, inventario de taludes, qué técnicas e instrumentos fueron utilizados para la recolección de la información, procesamiento y posterior análisis de los datos obtenidos, de manera que sean cumplidos los objetivos propuestos.

El tipo de investigación que se desarrolló en este estudio fue descriptivo, haciendo uso de la exploración de campo, debido a las características propias de la obtención de la información a lo largo del proyecto y a los estudios de laboratorio que se realizaron para determinar las características geotécnicas del suelo, tomando como referencias fuentes primarias y secundarias.

Las fuentes primarias consistieron en la observación y en los estudios de campo, toma de muestras alteradas e inalteradas, análisis de fotografías y la experiencia que se tiene por diversos trabajos que se habían realizado en la zona durante los últimos años, como las obras de mitigación ambiental y la colocación de puentes.

Las fuentes secundarias fueron aquellas en las cuales se contaba con información previa a cargo de empresas que han tenido que realizar varios estudios en la zona, como los estudios de SIG, ejecución de obra en la zona y algunos estudios de laboratorios realizados.

En este capítulo se presenta el proceso metodológico de la selección de los métodos, técnicas y herramientas para llevar a cabo la investigación de taludes de suelos y rocas blandas en la ruta No. 856.

3.1. Selección del caso de análisis y los taludes objeto de estudio

Como resultado de las disputas fronterizas que ha habido entre Costa Rica y Nicaragua en cuanto al deterioro ambiental ocasionado a lo largo de la frontera norte, al amparo del Decreto de Emergencia Nacional No. 36440-MP y tomando en cuenta las aspiraciones de un desarrollo progresivo por parte de Costa Rica, en el año 2011 se decidió construir una ruta que funcionara como trocha fronteriza, con la cual se contara con un mejor acceso a la frontera norte, garantizara protección fronteriza, protegiera la soberanía nacional, promoviera el desarrollo de la zona Norte y evitara conflictos entre países.

Sin embargo, las obras se llevaron a cabo sin estudios geotécnicos y sin diseño de trazado. Al considerarse más tarde la inadecuada manera en que se estaba llevando a cabo la construcción de la trocha, se decide ordenar la suspensión de la misma. Una vez que se suspenden las actividades en el año 2012, al cabo de pocos meses se empieza a observar taludes de corte y relleno que fallan, se detecta gran cantidad de sedimento que se dirigía al río San Juan, producto de rellenos mal compactados, caminos sin tratamiento, deforestación, construcción inadecuada de pasos con alcantarillas y pasos hechos de empalizadas que fueron arrastradas por el agua.

A causa de esta situación, se presenta un litigio internacional, por lo que el Estado costarricense decide lanzar un cartel de licitación para construir obras de mitigación en la sección río Pocosal-río Infiernito, donde se realizaron obras de control de erosión, como la colocación de fibras de coco, siembra de vetiver en los taludes, construcción de cunetas, construcción de pasos con alcantarillas, retención de sedimentos con barreras *siltfence*, lastrado del camino, perfilado de taludes, confección de bermas, construcción de contracunetas, entre otras labores, siempre dentro del mismo contexto de construcción de trocha fronteriza. Sin embargo, los trabajos realizados estaban encaminados solamente a mitigar el flujo de sedimentos al río San Juan sin la realización de estudios previos.

El Estado ha invertido gran cantidad de recursos con el objetivo de mitigar el daño y encontrar una solución favorable al conflicto. Sin embargo, los trabajos de mitigación resultaron infructuosos y muchos de los taludes colapsaron debido a las condiciones climatológicas de la zona, principalmente las fuertes lluvias y

las inundaciones, especialmente los taludes que fueron intervenidos realizando cortes y rellenos con ángulos inadecuados, tratamiento contra la erosión que no dio buenos resultados, cunetas que fallaron y lastrado con problemas de control de la evacuación del agua, tal como se muestra en la figura 3.1.



Figura 3.1. Colapso de obras de mitigación
Fuente: El autor Fecha: enero 2013

Ante los impactos generados como consecuencia de las intervenciones realizadas, se hace necesaria la participación multidisciplinaria para resolver los problemas ocasionados en la zona. Se decide entonces realizar una investigación y presentar carteles de licitación para la construcción de la ruta definitiva, que debía incluir el diseño geométrico, diseño de pavimento y elaboración de planos constructivos. Se crea entonces la RN No. 856, que corresponde a la ruta que pasa justo a lo largo de la frontera con Nicaragua, con una longitud total de 154,6 km y que se compone de las siguientes 5 secciones: sección 1, desde el poblado de Los Chiles hasta el río Pocosol; sección 2, desde el río Pocosol hasta el río Infiernito; sección 3, desde el río Infiernito hasta la boca del río San Carlos; sección 4, desde la boca del río San Carlos hasta la boca del río Sarapiquí y sección 5, desde la boca del río Sarapiquí hasta Delta Costa Rica.

Los diseños de estas secciones fueron adjudicados; sin embargo, hasta el momento ninguno de los diseños de estas secciones ha sido aprobado. La única sección que tiene avance es la sección 1: Los Chiles-río Pocosol, la que comprende una longitud de 37,50 km, con derecho de vía de 50 m, con un ancho de superficie de ruedo de 8,00 m y con la construcción de 3 puentes en proyecto.

En la trocha actual, la sección 2: río Pocosol-río Infiernito, es la única localizada en sectores montañosos y, por ende, es más propensa a la inestabilidad en los taludes. Esta sección tiene una longitud de 26 km y cuenta con un acceso adecuado. Además, es la sección donde se han presentado los problemas ambientales ocasionados por el flujo de sedimentos al río San Juan. Es por todo ello que se decide considerar esta sección como objeto de estudio. En la figura 3.2 se representa, en el mapa de Costa Rica, el trazo de la RN No. 856 y se resalta en rojo el trazo que corresponde a la sección objeto de esta investigación.

Desde el año 2011 hasta la fecha, se ha venido observando y recopilando información sobre las condiciones de los taludes y laderas de los 154,6 km de la zona fronteriza norte en cuanto a su comportamiento ante las diversas condiciones climáticas y trabajos realizados en ellos.

De lo anterior hay motivaciones personales y profesionales para realizar el estudio de los taludes de la RN No. 856. Desde el punto de vista personal el autor de la presente investigación ha presenciado y supervisado todas las intervenciones que se hicieron posterior a los trabajos realizados en la ruta desde el año 2011. Por tanto se cuenta con la experiencia y el conocimiento de primera mano, lo que motivó un gran interés en el estudio de los materiales inestables en algunas partes de la RN No. 856.

Desde el punto de vista profesional, al ser la zona en estudio considerada como una de las más complejas y por corresponder con una de las secciones que más atraso ha tenido en cuanto al proceso de diseño, es que surge la necesidad de estudiar la problemática real.

El acceso que se ha tenido a la información de diversos estudios realizados en la zona fronteriza norte, así como las recomendaciones que se han realizado en materia de mitigación ambiental, han sido razones para aplicar toda la experiencia adquirida en la ruta fronteriza No. 856 con el fin de llevar a cabo este proyecto de investigación.

Entre las actividades que se llevaron a cabo para la realización de la presente investigación está el reconocimiento de los sitios mediante sobrevuelo de las secciones en helicóptero. De esta forma, se contó con una perspectiva global desde el aire que permitió detectar algunos fenómenos de carácter superficial, identificando diversos deslizamientos importantes, así como características de los sistemas naturales de drenaje, los cuales reflejaban las condiciones del suelo; se apreciaron canales con sección redonda y en forma de U, así como una tonalidad característica que evidencia la presencia de arcillas y limos y su aparente contenido alto de humedad como se puede apreciar en las figuras 3.3 y 3.4.



Figura 3.2. Ubicación de la zona de estudio

Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Costa_Rica_location_map.svg



Figura 3.3. Sobrevuelo de taludes inestables en sección 3, RN No. 856

Fuente: El autor Fecha: noviembre 2014



Figura 3.4. Sobrevuelo de taludes en sección 2, RN No. 856

Fuente: El autor Fecha: noviembre 2014

Con el reconocimiento se determinaron elementos importantes que reflejaron evidencias de inestabilidad, tales como zonas de humedad, donde se apreciaron los cambios de tonos oscuros y claros; deslizamientos planares, donde se apreciaron pendientes suaves; deslizamientos de rotación, por su escarpe arriba de la cabeza del movimiento del suelo; formación de cárcavas; empozamientos de agua; grietas; árboles inclinados; alto grado de fracturamiento; alteración hidrotermal y presencia de elementos erosivos.

Una vez que se hubo observado todo el tramo, se seleccionaron para este estudio los taludes más propensos a la inestabilidad, se analizó el historial de las intervenciones que se habían realizado y sus efectos en los últimos cuatro años. De los taludes seleccionados se obtuvo información adicional para caracterizar el suelo y obtener los parámetros base para el análisis y posible solución del problema.

De conformidad con lo establecido en el *Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica* (2015), el alcance de la investigación está en dependencia de la complejidad geotécnica que es media, y del nivel de riesgo que es medio; lo que significa que la investigación se clasifica como de nivel B.

3.2. Análisis de algunas de las metodologías más importantes en el estudio de taludes y laderas

La investigación inició con una revisión de las principales tendencias teóricas y metodológicas sobre el tema. Fue necesario recopilar la información para conocer lo que se ha realizado a nivel mundial y nacional relacionado con estabilidad de taludes, así como de trabajos realizados propiamente en la zona de estudio desde el año 2013 (Murillo, 2013).

A nivel mundial existe una gran cantidad de investigaciones en las cuales se han desarrollado propuestas metodológicas por etapas, relacionadas con la solución a los problemas de estabilidad de taludes y laderas. Estas etapas, pasos y tareas se realizan con una filosofía que busca lograr seguridad y optimizar la solución de estabilidad mitigando el riesgo de pérdidas humanas, reduciendo daños materiales, ambientales o disminuyendo las pérdidas económicas.

En consonancia con esta filosofía, en el ámbito internacional se han realizado numerosas investigaciones que proponen metodologías que, en ocasiones, poseen etapas similares o combinan de una forma u otra, técnicas y procedimientos que buscan objetivos semejantes. Entre estas metodologías se destacan la metodología propuesta en España, por IGME (1986), por Ortuño (2004) y por Galván (2011); en Colombia, por Suarez (1998), por Barragán (2008) y por Hernández (2013); en Estados Unidos, por Mayne, Barry & DeJong, (2002) y USACE (2003); en Ecuador, por Morales (2012), por Quesada (2013) y por Espinoza y Tapia (2013); en Perú, por Pacheco (2006); y en Guatemala, por Romero (2011).

En el ámbito nacional, en Costa Rica se han implementado metodologías para el análisis de la estabilidad de los taludes, entre las cuales se mencionan algunos trabajos como el de Mora (2002) Ulloa y Vargas (2007), Valverde (2010), Mora (2010), Arrieta (2011), Barrantes, Barrantes & Núñez (2011), Mora &

Granados (2012), Soto, Chaves, Durán & Herra (2013), Cháves, Durán, Tierra & Soto (2014) y Campos (2015).

Otros trabajos importantes, presentados en seminarios a nivel nacional, hacen referencia al deslizamiento de la ciudad de Santiago de Puriscal (Fallas & Sáenz, 2014), que se complementa con el trabajo sobre el control de deformaciones en taludes mediante redes geodésicas (Picado, 2014), la elaboración de guías para reparación y restauración de taludes (García, 2014) y el estudio de los problemas de estabilidad de taludes en suelo (Bauzá, 2014).

Existen las metodologías que tratan situaciones particulares, como es el caso de la predicción de deslizamientos por medio del modelo TRIGRS de la USGS en Brasil (Vieira, Fernandes & Filho, 2010), el análisis cualitativo y cuantitativo de estabilidad de taludes y laderas (Oliva, 2015a), el caso de un talud de gran altura en La Panadella, España, que luego de 5 años de haberle realizado labores de estabilidad volvió a presentar grandes problemas de inestabilidad (García, González & De las Heras, 2013) y el caso de los taludes a los cuales se les da seguimiento durante años para determinar la hipótesis de la rotura (González, García de la Oliva & De las Heras, 2013).

Las principales metodologías y procedimientos analizados para realizar estudios de taludes y laderas, especialmente en suelos y rocas blandas, proponen un grupo de pasos, secuencias o etapas en los que se deben complementar determinados objetivos que pueden resultar obligatorios; sin embargo, las vías que proponen pueden ser variables, así como las técnicas y métodos para complementar los objetivos antes mencionados.

En Costa Rica se realizó un importante esfuerzo por sintetizar y ordenar, desde el punto de vista normativo, los principales aspectos metodológicos, así como los procedimientos y técnicas a emplear para realizar un estudio de taludes, en vista de las constantes pérdidas económicas y humanas que han sido objeto de preocupación de las autoridades encargadas del desarrollo y mantenimiento de carreteras. Este esfuerzo se vio materializado con la publicación del primer *Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica* (2015).

En aras del cumplimiento de los objetivos de la presente investigación, se procedió a analizar y establecer cuáles eran las invariantes fundamentales de los procedimientos o metodologías de estudio de taludes más importantes que han sido publicados. Se parte del supuesto que estas invariantes constituyen las etapas, pasos y tareas que, de una forma u otra, deben ser considerados en trabajos similares. De igual forma, se estudiaron minuciosamente las características, las especificidades y los aspectos novedosos que podrían ser integrados en el cumplimiento de los objetivos de la presente investigación.

De esta manera, el *Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica* (2015) (de ahora en adelante CGTLCR (2015)), establece una guía a seguir, una serie de pasos importantes para llevar a cabo un estudio de estabilidad de taludes y laderas que se complementa con criterios de diseño en cuanto a nivel y factores de seguridad mínimos y con instrumentación geotécnica.

A partir del análisis bibliográfico se elaboró un cuadro que resume las principales invariantes de cada una de las metodologías, que no son más que las etapas y pasos que se deben seguir, y sus principales aportes, los cuales son mostrados en el Apéndice 1. Para abarcar un estudio completo de estabilidad de taludes y laderas, se establecieron las siguientes tres invariantes: estudios geotécnicos preliminares, estudios geotécnicos detallados, y análisis y diseño de la solución. La tercera invariante, análisis y diseño de la solución, incluye tres importantes aspectos que tienen una relación muy estrecha entre sí: análisis y modelado, diseño de la solución y estudios complementarios y monitoreo.

A continuación se presenta un análisis pormenorizado de las características fundamentales de las principales metodologías antes mencionadas con base en el análisis de las invariantes establecidas en el cuadro del Apéndice 1.

3.2.1. Análisis y discusión de las invariantes (etapas)

Estudios geotécnicos preliminares

La primera invariante establecida, que constituye el paso inicial de cualquier investigación, es la evaluación preliminar del talud, la cual consiste en la evaluación de las condiciones generales del proyecto y se debe realizar antes de iniciar con las investigaciones geotécnicas detalladas. Es de vital importancia, además de la recopilación de la información, realizar un informe de inspección preliminar, para lo cual el CGTLCR (2015) propone el uso de un formato de informe de inspección de talud a manera de plantilla ya establecida.

De acuerdo con la literatura investigada y con las metodologías sintetizadas en el Apéndice 1, la gran mayoría de los autores, tanto nacionales como internacionales, considera muy importante llevar a cabo este primer paso en el estudio de la estabilidad de taludes, independientemente de cómo implementaron las etapas posteriores de investigación y diseño. Dichos autores realizaron un adecuado estudio de la información disponible, la correspondiente inspección inicial del talud para elaborar el informe de inspección preliminar y elaboraron estudios topográficos y de reconocimiento geológico. La información obtenida en esta etapa es de vital importancia para la planificación de las investigaciones geotécnicas de campo y laboratorio a ejecutar (ACG, 2015). En este sentido destacan los trabajos de IGME (1986), Ortuño (2004), Romero (2011), Quezada (2013), Hernández (2013), Suárez (1998), Valverde (2010), Mora (2010), Soto, Chaves, Durán & Herra (2013), Bauzá (2014), y Campos (2015).

Estudios geotécnicos detallados

Como segundo paso invariante, tomando en cuenta lo que dice el CGTLCR (2015), se tienen las investigaciones geotécnicas, con las cuales se persigue ejecutar, de una manera confiable, el modelo geotécnico de acuerdo con la necesidad y el tipo de solución que se deba realizar al proyecto en particular. En este sentido, el CGTLCR (2015) hace referencia a la asignación de las labores a un profesional responsable; sin embargo, Suárez (1998) hace énfasis en la participación de un conjunto de profesionales de diferentes áreas: geólogos, hidrólogos, ingenieros forestales, ingenieros topógrafos y geotecnólogos, con los cuales se deben realizar los trabajos de investigación. Es imprescindible que en este paso se realice la planificación del estudio, debido a que en esta etapa se deben realizar los ensayos de campo y de laboratorio, para lo cual se debe organizar previamente las investigaciones con base en el reconocimiento geológico (ACG, 2015).

En las metodologías estudiadas, IGME (1986) y Suárez (1998) hacen la propuesta de realizar una serie de ensayos de campo y de laboratorio en esta etapa, mencionan, sobre todo, la importancia de realizar los estudios geotécnicos detallados mediante métodos de investigación directos e indirectos, como también establece el CGTLCR (2015), y determinar la superficie de falla. En general, todos los autores en los estudios que realizaron coinciden, de una forma u otra, en que en esta etapa se realiza la caracterización de las propiedades de los materiales del talud o ladera.

Análisis y diseño de la solución

- Análisis y modelado

El tercer paso que menciona el CGTLCR (2015) se refiere a que, una vez definidos los aspectos geométricos del talud, se debe realizar el análisis de taludes y laderas determinando el proceso de inestabilidad, ya sea en suelo o roca, y definir el modelo geotécnico para el análisis de la estabilidad, teniendo en cuenta el criterio de ruptura y el método de análisis a implementar y, si es necesario, otros procesos de análisis complementarios al estudio realizado.

Con base en lo anterior, autores, como Ortuño (2004), proponen la aplicación de los análisis retrospectivos; otros, como Galván (2011), desarrollan análisis específicos para resolver un tema en especial. Quezada (2013) realiza el análisis de la estabilidad mediante el método de elementos finitos. Resaltan los trabajos realizados por Mora (2010), donde se utilizan los métodos de análisis probabilísticos y el efecto de la

resistencia en las raíces, así como el trabajo de Mora & Granados (2012) sobre el análisis cualitativo de estabilidad haciendo uso de los parámetros de entrada difusos. Campos (2015), en su trabajo considera también métodos establecidos en el CGTLCR (2015), así como el uso de programas computacionales para estimar el grado de seguridad. Se destaca la aplicación del análisis retrospectivo en los trabajos de Ortuño (2004), Pacheco (2006) y Bauzá (2014).

Por otro lado, existen las metodologías en las cuales se realiza el proceso de calibración de los modelos, en diferentes ámbitos; un ejemplo de aplicación de la calibración fue en ensayos de tracción en probetas de losas compuestas. En este caso se realiza la calibración por medio de la determinación de los parámetros de los materiales, tomando como base resultados experimentales obtenidos (López, Larrúa & Recarey, 2009). Otro ejemplo de aplicación de la calibración es en el modelado y análisis estructural de un puente, donde se da importancia a que el modelo tiene que estar bien calibrado con respecto a los ensayos reales y a que en el proceso de calibración se pueden variar interactivamente los datos mediante tanteos (Gomes, 2009). También, existen aplicaciones en las que se hace la caracterización tenso-deformacional empleando la calibración matemática y física para problemas ingenieriles, con ésta se determinan o ajustan con cierto grado de fiabilidad los parámetros que caracterizan el modelo constitutivo, a partir de la técnica de experimentación empleada, obteniendo el grado de “refinamiento” contrastado contra un patrón que se asume fiable (Álvarez, Mesa, Recarey & Hernández, 2016).

Desde el punto de vista de las metodologías en la estabilidad de taludes, se ha aplicado el proceso de calibración del modelo en la determinación del nivel de amenaza por fenómenos de remoción en masa, para ello se analizó antes la morfología del talud y, por medio del proceso de retro-cálculo se calibró el modelo geotécnico ajustando los parámetros para obtener el $FS=1$ (Chaparro & Vargas, 2012). Se ha aplicado también la calibración del modelo geotécnico a partir del retrocálculo, y fotografías de eventos ocurridos en movimientos en masa importantes, como las corrientes de derrubios (Raïmat et al., 2013). En la realización del estudio de desprendimientos rocosos se ha aplicado la calibración del modelo a casos reales, determinados a partir del estudio de los desprendimientos antes sucedidos y obtenidos mediante datos históricos y testimoniales (Torrebadella, Altimir, Amigó & Ferrer, 2013). En la aplicación de la calibración de modelos geotécnicos a partir de los resultados de distintos programas computacionales, se toman en cuenta ensayos de campo y de laboratorio para validar los parámetros que permitan la caracterización geomecánica (Guerra & Pinzón, 2015) y en los análisis de seguridad a largo plazo de un relleno sanitario, se ha aplicado también la calibración de los parámetros del suelo por medio de retrocálculo con el fin de obtener los parámetros de resistencia y rigidez del suelo, a fin de reproducir la respuesta obtenida en campo con la instrumentación (Parra & Ovando, 2012).

El CGTLCR (2015) establece otros procedimientos de análisis opcionales, entre los cuales resulta conveniente el método de retrocálculo como complemento a los estudios realizados con otros métodos de análisis; por ejemplo, para efectos de esta investigación, la aplicación del retrocálculo se complementa con el método de equilibrio límite.

- *Diseño de la solución*

Con base en la gran variedad de sistemas de protección y estabilización de taludes y laderas que menciona el CGTLCR (2015), la mayoría de las metodologías de investigación estudiadas consideraron la solución por medio de modificación geométrica del talud o ladera y limitaron su estudio hasta el análisis de la estabilidad sin diseñar soluciones que considerasen la evaluación realizada. A diferencia de esos estudios, en la presente investigación se consideró importante brindar soluciones de estabilidad a los problemas encontrados y analizados.

Romero (2011) consideró la necesidad de realizar e implementar las soluciones apropiadas en su diagrama metodológico propuesto. Un trabajo importante realizado por Quezada (2013) presenta ampliamente una serie de soluciones, a las cuales llama “medidas de mitigación”. También se puede mencionar en este sentido a Hernández (2013), quien con base en la valoración del grado de riesgo asociado a la vulnerabilidad física,

propone medidas de mitigación que coinciden con los sistemas de revestimiento de taludes que menciona el CGTLCR (2015).

Mora (2002) propone una solución a la estabilidad mediante explotación del material y manejo del agua subterránea, alternativas también consideradas por el CGTLCR (2015). Ulloa y Vargas (2007) proponen en particular mejorar la estabilidad con materiales livianos, lo cual que no está contemplado en el CGTLCR (2015).

- *Estudios complementarios y monitoreo*

Entre los trabajos dedicados al desarrollo del tema de la instrumentación y monitoreo, donde se contempla una gran variedad de métodos de instrumentación y aplicaciones con características similares a las establecidas en el CGTLCR (2015), se pueden mencionar los de Obando (2009), Suárez (2009), Ortuño (2004), trabajos sobre los diferentes métodos de auscultación geotécnica (Alpízar, 2014) y el trabajo de Oliva (2015b), en el cual se estudiaron programas, técnicas y procedimientos de instrumentación. Se han elaborado guías de implementación adecuadas de sistemas de instrumentación para ser aplicadas en taludes de carreteras (Castrillón & Quintero, 2012) y Valverde (2010) resalta su importancia y propone diversos métodos de instrumentación y monitoreo.

El CGTLCR (2015) hace énfasis en la importancia de establecer sistemas de monitoreo y alerta para corroborar el modelo geotécnico realizado, haciendo énfasis en la necesidad de garantizar protección, tanto de vidas como de la infraestructura y el ambiente. Toda la información obtenida en esta etapa es de vital importancia para controlar el comportamiento de los taludes o laderas frente a la inestabilidad, así como para la toma de decisiones que permitan mejorar la eficacia de los mantenimientos preventivos y correctivos.

Con base en el análisis de las metodologías estudiadas anteriormente, nacionales e internacionales, en el presente estudio se elaboró un procedimiento metodológico para el análisis de estabilidad y diseño de taludes en suelos y rocas blandas en la RN No. 856, que se desarrolló en varias etapas de ejecución. Es importante mencionar que este documento es coherente con la filosofía del CGTLCR (2015), a pesar de que más del 80 % del trabajo, aproximadamente, se realizó previo a la publicación de dicho código.

Esta metodología permitió, a partir del detallado conocimiento geotécnico de las propiedades de estos materiales, el modelado y calibración de los modelos, y la propuesta de soluciones ingenieriles más adecuadas para estos problemas. Con la metodología del presente estudio se sistematizó el conocimiento teórico y práctico que existe en el ámbito nacional e internacional, relacionado con la caracterización, modelado y propuesta de soluciones para la inestabilidad de taludes en obras viales.

3.3.Descripción detallada del esquema metodológico de investigación

A partir del análisis de invariantes mostrado en el Apéndice 1 y del análisis que se realizó sobre ellas se procede a proponer la secuencia metodológica de etapas, pasos y tareas que es necesario implementar para dar cumplimiento a los objetivos de esta investigación.

La metodología para este estudio se compone de cuatro etapas: estudios preliminares, estudio detallado, modelado y calibración del modelo geotécnico, y diseño y recomendaciones constructivas. Los propósitos que se persiguen en cada etapa son los siguientes:

- A. Etapa de estudios preliminares.** Recopilación de la información de archivo, visitas al sitio y evaluación rápida de los taludes. ¿Cómo realizar el estudio detallado de los taludes? ¿Qué taludes investigar?
- B. Etapa del estudio detallado.** Evaluación geométrica del talud y caracterización de las propiedades físico-mecánicas de las diferentes capas. ¿Cuáles son los parámetros para el modelado?

C. Etapa de modelado y calibración del modelo geotécnico. Se realiza el modelado y calibración por medio de retrocálculo, de los taludes en estudio. ¿Cuáles son los valores de convergencia?

D. Etapa de diseño y recomendaciones constructivas. Se propone la solución de estabilización a la inestabilidad de los taludes en estudio. ¿Qué tipo de solución se propone?

En cada etapa se debe llevar a cabo una serie de tareas, cuya consecución puede alcanzarse por diversas vías, aunque su cumplimiento resulta obligatorio a la hora de evaluar y proponer las soluciones para los problemas de inestabilidad de los taludes objeto de estudio. En la figura 3.5 se representa la metodología para el análisis de la estabilidad de taludes en suelos y rocas blandas utilizada en la presente investigación.

Se detalla a continuación el desarrollo de cada uno de los aspectos tomados en cuenta en el flujograma metodológico de la figura 3.5, describiendo cada una de las actividades necesarias para la obtención de la información, así como las técnicas e instrumentos que fueron utilizados y la manera de procesar la información para su mejor interpretación.

3.3.1. Etapa de estudios preliminares

En esta etapa se detallan los aspectos preliminares que se tomaron en cuenta para planificar adecuadamente el estudio detallado.

Consistió en la revisión de los materiales de archivo, antecedentes de trabajos en la zona, comportamiento de estructuras existentes, y cualquier otra información del sector objeto de estudio que fue útil para el proyecto. Además, se realizaron visitas de reconocimiento y constatación de la información recopilada. Finalmente, se planificaron los trabajos detallados.

3.3.1.1. Investigación de la geología regional

La información básica proveniente de la documentación geológica de los trabajos realizados respecto a la geología y evolución del Arco del Sarapiquí, así como del mapa geológico de Costa Rica escala 1:50 000, se utilizó para conocer preliminarmente los materiales de que se compone la zona de estudio, las diferentes unidades geológicas de que se compone la misma, las litologías asociadas, grados de alteración y condiciones geotécnicas y geomecánicas generales. Se determinó con precisión suficiente, tanto la naturaleza de los problemas geológicos, como las características geológico-geotécnicas del suelo.

Una vez estudiada la información del entorno geológico, se contó con la información necesaria para fundamentar lo que sería el plan detallado de la investigación, en cuanto a los ensayos que se debían realizar a los taludes en estudio. Con el conocimiento de la geología regional se logra una mejor dirección y mayor seguridad, tanto en la ejecución de los ensayos como en la ejecución de las obras en el futuro.

3.3.1.2. Inspección visual de campo

▪ Geología local

La primera parte de la investigación del suelo se llevó a cabo mediante la exploración geotécnica del sitio haciendo uso de las fichas de informe de observación de los taludes. La información obtenida fue utilizada, tanto para la planificación de las investigaciones geotécnicas de campo y laboratorio, como para el proceso de modelado.

En esta etapa se visitó el sitio de los taludes para realizar la inspección visual de campo, para lo cual se procedió a realizar caminatas por la sección río Pocosol-río Infiernito, observando detalladamente cada uno de los taludes de corte que presentaban evidencia de inestabilidad y constatando la información recopilada de archivo mediante una inspección geológica exhaustiva a lo largo del trazado. Se tomaron fotografías a los taludes y se registró la información en fichas de observación.

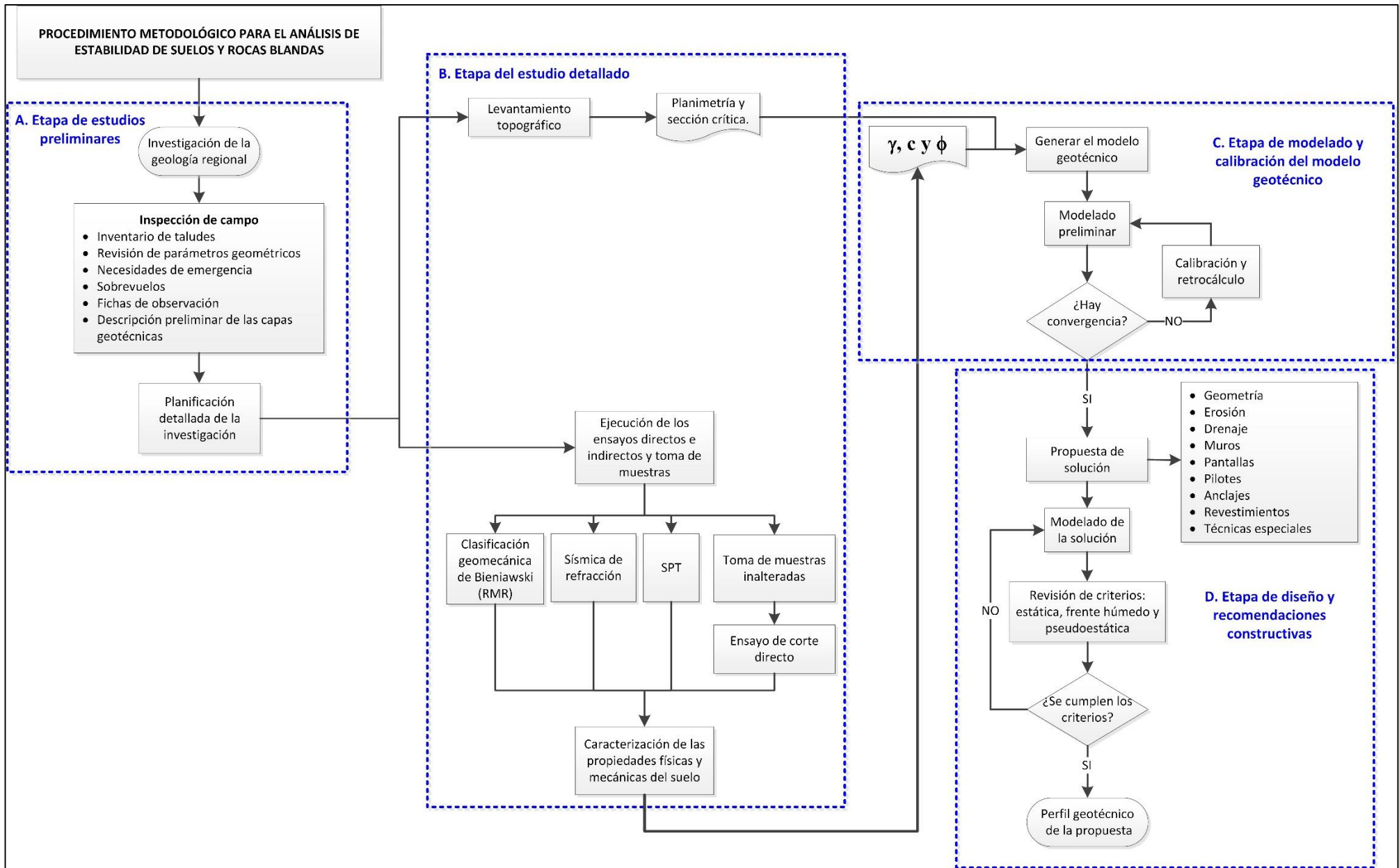


Figura 3.5. Diagrama de flujo del procedimiento metodológico empleado para el análisis de estabilidad de taludes en suelos y rocas blandas en la RN No. 856

Para cada talud se confeccionó una ficha de informe de inspección de talud, donde se recogieron las observaciones realizadas durante el levantamiento geológico geotécnico, describiendo las características observadas e incluyendo su geometría, litología y la evaluación de las condiciones geotécnicas, geomecánicas y de estabilidad.

Los principales detalles de la geología local obtenida a partir de estas observaciones se registraron en una ficha similar a la que propone el CGTLCR (2015), y cuyos detalles principales son: nombre del talud, nombre del proyecto, ubicación del talud en coordenadas CRTM05, altura del talud, longitud del talud, litología, buzamiento, fracturamiento, nivel de meteorización, condición de humedad, si presenta fallas visibles, si es apto para geofísica, rasgos geofísicos y rasgos erosivos y otras observaciones.

Las fichas de evaluación rápida de estos taludes de corte en la sección estudiada aparecen en el Apéndice 2.

Se elaboró, además, un mapa con el programa Quantum Gis de QGIS® (versión 2.4.0-Chugiak) bajo la Licencia Pública General GNU, con base en el levantamiento que se realizó con GPS. Este mapa contiene un inventario de los taludes de la zona y fue útil para seleccionar los taludes objeto del estudio. Contiene información en coordenadas del sistema de información CRTM05, a escala adecuada, y con la información necesaria para ubicar exactamente los taludes.

3.3.1.3. Planificación del estudio detallado

Como resultado del desarrollo de la etapa preliminar, se elaboró un plan de acción a seguir en el cual se detallaron las tareas que llevaron a la solución de estabilización. Se identificaron los ensayos de campo y de laboratorio necesarios en la etapa de investigación detallada, como el levantamiento topográfico y las investigaciones geotécnicas de campo y laboratorio, que permitieron la caracterización de las propiedades físicas y mecánicas del suelo. Para ello se definió el tipo, cantidad, localización y profundidad de las investigaciones de campo y de laboratorio que se decidió ejecutar. La información obtenida en esta etapa se utilizó posteriormente para la elaboración del modelo geotécnico.

3.3.2. Etapa de la investigación detallada

En esta etapa se dio cumplimiento al programa de trabajo, y se realizaron las adecuaciones necesarias, según los avances y resultados parciales que se obtuvieron.

Se realizaron los ensayos con el fin de obtener los datos característicos necesarios para la modelación de la solución de estabilidad de los taludes objeto de estudio.

Los taludes seleccionados fueron evaluados mediante ensayos de perforación, ensayos de laboratorio, ensayos de geofísica con el método de sísmica de refracción, y clasificación geomecánica de Bieniawski (1989), el Rock Mass Rating (RMR), como un método alternativo. Los ensayos geofísicos fueron tomados de los trabajos realizados por la empresa GeoStratu Consultores S.A. en la zona de estudio, mientras que la empresa CACISA S.A. brindó información general acerca de los estudios realizados en la zona. La toma de muestras, así como los ensayos directos que se ejecutaron en laboratorio, fueron realizados por el autor, en conjunto con los laboratorios de control de calidad que apoyaron la investigación, y se contó con la supervisión del ingeniero Domingo Delgado Martínez.

La aplicación de diferentes técnicas permitió el ajuste de las correlaciones de estimación de las propiedades y la calibración de los modelos que fueron analizados detalladamente.

El estudio detallado permitió establecer, en conjunto con otras técnicas y métodos de análisis, los modelos geotécnicos para la modelación de los taludes.

3.3.2.1. Levantamiento topográfico

Dado que existen evidencias de movimiento activo, situación que se ha observado a lo largo de los años, se decide realizar el levantamiento plano altimétrico del sitio de los taludes que fueron seleccionados para el estudio. Para ello se definieron los sectores y puntos de interés para su posterior análisis.

El levantamiento topográfico se llevó a cabo con estación total para generar las curvas de nivel y obtener las superficies de los taludes en estudio. La topografía generó información básica para el análisis de los movimientos. En este estudio se obtuvo la localización de las áreas de deslizamiento por medio de las coordenadas en proyección Transversal de Mercator para Costa Rica CRTM05. Se hizo el levantamiento de las curvas para determinar los sectores deslizados o que estaban en proceso de movimiento. Se localizaron los focos de erosión y la evidencia de los movimientos y se obtuvieron las dimensiones de las pendientes, de las alturas, así como los sistemas de drenaje existentes.

3.3.2.2. Planimetría y sección crítica

Se elaboraron y se editaron los planos y perfiles con la información geotécnica del área, con curvas de nivel y los perfiles del talud. Fue la información de partida para generar los modelos geométricos de los taludes a estudiar.

3.3.3. Ejecución de los ensayos directos e indirectos y toma de muestras

Se procedió a investigar los taludes objeto de estudio. Se propuso utilizar los siguientes métodos: clasificación geomecánica de Bieniawski (1989), trabajos geofísicos (sísmica de refracción), ensayos de campo (prueba de penetración estándar), y la toma de muestras alteradas e inalteradas para la realización de ensayos de laboratorio de determinación de propiedades físicas y mecánicas. Se consideró el tipo de ensayo, la cantidad, la localización y profundidad de las investigaciones de campo.

3.3.3.1. Clasificación geomecánica de Bieniawski o RMR (*Rock Mass Rating*)

La evaluación de los taludes se realizó por medio de la observación y análisis detallado de los seis elementos de mecánica de rocas que incluye la clasificación RMR (Bieniawski, 1989). Estos elementos son: resistencia de la matriz rocosa, índice RQD, separación entre diaclasas, estado de las discontinuidades, evidencia de agua freática y orientación de las discontinuidades con respecto a la cara de los taludes.

Se realizó la clasificación geomecánica en un metro cuadrado (m^2) de superficie de afloramiento de roca en tres puntos diferentes de cada talud. Los resultados se expresan en términos de valores promedio de los tres puntos por talud.

La resistencia de la matriz rocosa de cada talud fue medida por medio del golpe del martillo de geólogo contra una muestra de roca y comparada con los cuadros del Anexo 1.

Se realizó la clasificación mecánica de los taludes objeto de estudio, los cuales se componen de rocas de diferentes litologías y distinto comportamiento mecánico. Para llevar a cabo su clasificación, fue evaluada la condición más crítica de cada afloramiento.

Esta clasificación proporciona información importante para inferir por medio de correlaciones los valores los pesos específicos, la cohesión y la fricción del material, y facilitar la caracterización del material, para lo cual, se utilizó el programa RocData 3.0® de RocScience que permitió determinar parámetros de resistencia del suelo y del macizo rocoso y que establece correlaciones a partir del valor del GSI, la resistencia a la compresión uniaxial, el peso específico de la roca y la altura del talud.

3.3.3.2. Sísmica de refracción

El estudio geofísico se realizó según la norma D-5777 de la ASTM (ASTM International, 2000), que establece cómo medir por el método de refracción sísmica las velocidades de las ondas primarias generadas

en cada sitio de talud, con lo que se determinó el perfil geotécnico y la evaluación de forma indirecta de las propiedades físicas y mecánicas de las diferentes capas de suelos y estratos de roca.

La instrumentación sísmica se realizó con un equipo Smartseis, de la casa GEOMETRICS en California, USA, con geófonos OYO Geospace™ de 14 Hz. Como fuente de energía para todos los perfiles fue usado un mazo de 12 libras. El equipo incluye un ordenador, pantalla de cristal líquido para ver los datos y compararlos en forma instantánea, así como un monitor de ruido para hacer los tiros en períodos de “quietud sísmica”, esto es, evitando el viento y otros ruidos locales, como se aprecia en la figura 3.6.

En el trabajo de campo se colocaron geófonos separados cada 3,00 m a lo largo de cada perfil, con longitudes entre 70 m y 100 m. Fueron colocados 5 puntos de disparo por perfil, uno en cada extremo del tendido, a 2,50 m de los geófonos 1 y 24, otro en el centro del tendido, entre los geófonos 12 y 13, y, por último, un disparo entre los geófonos 6 - 7 y 18 -19, como se muestra en la figura 3.7.

El método de procesamiento usado fue el de Hagiwara (1974), análisis que permiten obtener la profundidad de “n” interfaces bajo cada geófono.

En refracción sísmica, las fuentes de error posibles incluyen, además de los errores topográficos, la lectura de los tiempos de arribo (± 2 ms) y el cálculo de las velocidades y profundidades de las interfaces. Este último punto significa que, para estratos profundos, el error es acumulativo dependiendo del contraste de la impedancia acústica.

Los errores estimados para las primeras capas pueden ser de hasta un 10 %. Para capas profundas, el error puede alcanzar hasta 15 % sobre la profundidad total. Las profundidades de investigación máximas alcanzadas son de unos 25 - 30 m.



Figura 3.6. Sismógrafo SmartSeis ST
Fuente: <http://geometrics.com/>

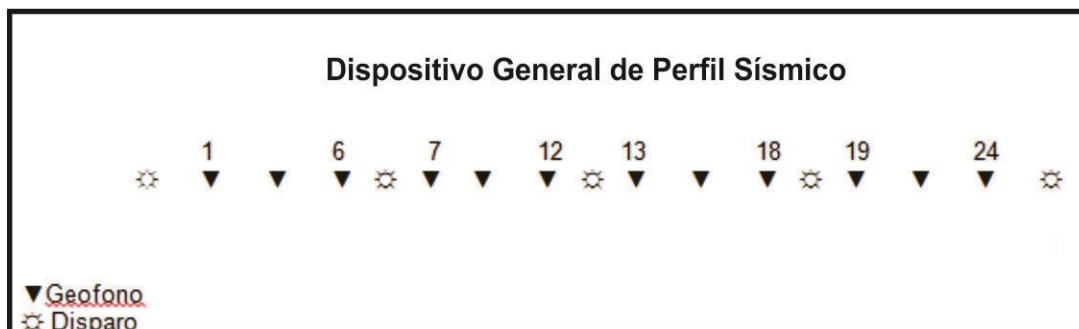


Figura 3.7. Dispositivo general de los perfiles sísmicos de refracción realizados
Fuente: GeoStratu Consultores S.A.

3.3.3.3. Ensayos de perforación SPT

Se realizó el estudio geotécnico para obtener la caracterización de cada uno de los taludes. Como técnica de investigación se utilizó la perforación, mediante la prueba de penetración estándar, según la norma D 1586 de la ASTM (*Standard Test Method for Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampler of Soils*) (ASTM International, 2008).

En consonancia con la norma D1586 de la ASTM (ASTM International, 2008), a cada uno de los taludes seleccionados se le tomó una muestra representativa y se le realizaron ensayos de laboratorio para definir el perfil geotécnico y las propiedades físico-mecánicas de las capas de suelos y estratos de rocas blandas presentes en los taludes. El método de ensayo se aplicó en todos los taludes seleccionados.

Con respecto a los grados de incertidumbre del estudio geotécnico, es importante destacar que las perforaciones son ensayos puntuales, de profundidad limitada por la energía disponible para la penetración del terreno y, por consiguiente, brindan información sobre las condiciones específicas detectadas en este punto y a la profundidad máxima alcanzada por el método de exploración (SPT). A pesar de esta limitación, con base en las perforaciones que se realizaron y el conocimiento que se tiene de la zona, fue posible tener una noción precisa de las condiciones geotécnicas existentes, que permitieron desarrollar posteriormente un modelo geotécnico.

En una matriz (registro de perforación) se registraron los datos de cada perforación. El contenido de la matriz comprendió los siguientes aspectos: identificación de cada talud, ubicación del sitio de la perforación en coordenadas geográficas, cantidad de capas que se obtienen y metros perforados totales por capa. Asimismo, se realizaron los registros de cada perforación y se generaron los perfiles de los taludes en estudio, los cuales se encuentran en el Apéndice 3. En cada uno de estos registros de perforación se muestra la información básica de la ubicación, profundidad total alcanzada, elevación y descripción de cada capa geotécnica con su correspondiente número de golpes.

3.3.3.4. Toma de muestras inalteradas

Una vez definidas las capas geotécnicas, se extrajo de cada estrato del talud en estudio al menos una muestra inalterada representativa mediante el método del bloque a cielo abierto, extrayendo un bloque de suelo con dimensiones de 200 x 200 x 200 mm, protegido con parafina, para transportarlo cuidadosamente en una caja de madera al laboratorio para su análisis respectivo.

Las muestras inalteradas se emplearon en la realización de ensayos mecánicos específicos, como el ensayo de corte directo.

3.3.3.5. Ensayo de corte directo

Para determinar la resistencia cortante del suelo se aplicó el ensayo de corte directo de conformidad con la norma D 3080 de la ASTM (ASTM International, 1998b). Con este objetivo se emplearon muestras inalteradas tomadas de los taludes objeto de estudio mediante un bloque tallado a cielo abierto. Los tiempos de corte empleados en el ensayo se basaron en las recomendaciones de dicha normativa.

Con el ensayo de corte directo en condición drenada (CD) se determinó la envolvente de falla para obtener gráficamente los valores de cohesión (c') y ángulo de fricción (ϕ'), a fin de establecer la resistencia al corte de los suelos ensayados en términos de esfuerzos efectivos. Estos parámetros se utilizaron en dos condiciones de análisis: en el análisis de estabilidad a largo plazo en la condición estática considerando el nivel freático y en el análisis estático sin considerar el nivel freático.

Asimismo, se llevaron a cabo pruebas de corte directo en condición no consolidada no drenada (UU) con el fin de realizar el análisis de estabilidad a corto plazo para la condición de análisis pseudostática y para realizar el análisis en la condición de frente húmedo utilizando los parámetros en términos de esfuerzos totales (c , ϕ).

Según Suarez (1998), una de las formas de simular la falla de taludes en períodos de lluvias intensos y prolongados es considerando una zona saturada por acción de un frente húmedo (frente de infiltración) en el que el suelo se comporta con una resistencia no drenada, produciendo deslizamientos inmediatos por saturación.

3.3.3.6. Caracterización de las propiedades físicas y mecánicas del suelo

Como parte de la metodología se propone la realización de una serie de ensayos de laboratorio cuya ejecución es imprescindible para la correcta caracterización de las capas geotécnicas y modelado posterior de los taludes.

Los suelos recuperados de las perforaciones fueron descritos y muestreados por capas, de forma representativa, para su caracterización y clasificación. A partir de las perforaciones realizadas se determinó el volumen necesario de ensayos de laboratorio. Una parte de las muestras obtenidas fue evaluada exclusivamente a partir de la clasificación tacto visual.

A las muestras se les realizaron los siguientes ensayos:

- *Ensayos físicos:*

- ✓ Granulometría, según norma C 136-01 de la ASTM (ASTM *International*, 2001) o AASHTO T027/11 (AASHTO, 2014).
- ✓ Índices de consistencia, según la norma D 4318 de la ASTM (ASTM *International*, 2005) o AASHTO T089/90 (AASHTO, 2013)
- ✓ Humedad natural, según norma D 2216 ASTM (ASTM *International*, 1998a)
- ✓ Peso específico relativo, según norma D 854 de la ASTM (ASTM *International*, 2002b).
- ✓ Densidad aparente por el método de la parafina, norma D-4531 de la ASTM (ASTM *International*, 2002a).

En esta etapa se consolidó toda la información detallada proveniente de los ensayos realizados y se confeccionaron los cuadros que resumen las propiedades físicas y mecánicas. Asimismo, a partir de las descripciones geológicas, las clasificaciones geomecánicas, los valores de velocidades de ondas sísmicas y los resultados de las perforaciones y ensayos de laboratorio, se lograron establecer las capas geotécnicas de los taludes.

Para la caracterización geotécnica de las propiedades físicas del suelo en los taludes, se realizó la clasificación mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), según la norma D 2487 de la ASTM (ASTM *International*, 2006a), por capa por talud, y se determinó el peso específico en correspondencia con la norma D 4531 de la ASTM (ASTM *International*, 2002a).

De esta manera, se determinaron los porcentajes de grava, arena y finos presentes en el suelo, los límites de su estado de consistencia, los pesos mencionados específicos secos, humedad y peso específico relativo de los sólidos, de acuerdo con las normas mencionadas en este apartado.

Los resultados de ensayos de laboratorio mencionados en este apartado se presentan en el Anexo 3.

3.3.4. Etapa de modelado y calibración del modelo geotécnico

En esta etapa se genera el modelo físico con un tamaño y escala tal que permitan analizar el problema adecuadamente, y se realiza un proceso de modelado preliminar hasta lograr calibrar el modelo físico de forma que reproduzca la misma respuesta observada en el objeto real.

3.3.4.1. Generación del modelo geotécnico

Con base en la investigación que se ha desarrollado en la etapa del estudio detallado, se crea el modelo geotécnico, el cual corresponde al modelo que se utilizará en el análisis. Debe contener las capas geotécnicas, la profundidad del nivel freático, las capas geofísicas, la toma de muestras, las profundidades de las capas con el SPT y la escala. Se debe representar en planimetría la ubicación de los ensayos realizados y cualquier otra información que se considere importante.

3.3.4.2. Modelado preliminar

La metodología de análisis que se empleó para el análisis de la estabilidad es la del equilibrio límite y el criterio de ruptura que se utilizó es el de Mohr-Coulomb.

Esta metodología no toma en cuenta las deformaciones, por lo que es limitada en este sentido, debido a que las distribuciones de presiones en muchos casos no son realistas. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que estos esfuerzos no realistas generalmente ocurren en algunas dovelas del análisis y no significa que el factor de seguridad general sea inaceptable.

Dentro de los métodos de equilibrio límite existen varias teorías de análisis que poseen consideraciones particulares. Para el presente análisis se empleó el método de Morgenstern y Price (1965), el cual satisfizo las condiciones de equilibrio, facilitó los cálculos matemáticos y permitió la definición de superficies de falla curvas típicas de zonas tropicales.

En ausencia de estudios de amplificación dinámica, se deben utilizar los coeficientes pseudoestáticos horizontales presentados en el cuadro 2.9 para el análisis sísmico de taludes permanentes con base en el método del equilibrio límite (ACG, 2015). De acuerdo con lo anterior, en el caso de estudio, para la condición pseudoestática, se empleó un coeficiente dinámico de 0,15 en la componente horizontal.

Para el caso de los taludes de este estudio, se hace uso del cuadro 2.8, considerando el riesgo de pérdida de vidas con un valor medio, y el riesgo de daños económicos y ambientales como medio para las condiciones de análisis presentadas en el cuadro, es decir, un valor de $FS=1,40$ para la condición estática y un valor de $FS=1,05$ para la condición pseudoestática.

Con la generación del modelo geotécnico y con los intervalos de los valores geotécnicos de c' y ϕ' provenientes de todos los ensayos realizados, se procedió a realizar los análisis de cada uno de los taludes. Los análisis de estabilidad de taludes se realizaron con el programa SLOPE/W® (GEO-SLOPE International, Ltd, 2012), el cual es de gran utilidad, sencillo de utilizar y bastante completo y, además, permite realizar el análisis de los taludes con el método de cálculo de Morgenstern y Price. SLOPE/W® es un programa con el que se pueden realizar análisis con múltiples tipos de suelos con diferentes geometrías y estratigrafías y con superficies de falla de diversos tipos.

En el programa se ingresaron los valores geotécnicos anteriormente mencionados por cada capa geotécnica.

Los taludes se modelaron considerando cuatro condiciones:

- 1) Condición de análisis para resistir las solicitaciones estáticas considerando el nivel freático en condiciones drenadas.
- 2) Condición de análisis para resistir las solicitaciones estáticas sin considerar el nivel freático en condiciones drenadas.
- 3) Condición de análisis para resistir las solicitaciones estáticas con frente húmedo, considerando el nivel freático, en condiciones no drenadas para las capas superiores y drenadas para las capas inferiores.
- 4) Condición de análisis para resistir las solicitaciones sísmicas (condición pseudoestática) en condiciones no drenadas.

Para obtener información más detallada, únicamente en las laderas se modeló considerando, además, dos condiciones adicionales:

- 1) Condición de análisis para resistir las solicitaciones sísmicas en condiciones drenadas.
- 2) Condición de análisis para resistir las solicitaciones sísmicas con frente húmedo en condiciones no drenadas.

En taludes que tengan pendientes medianas en los cuales existan zonas expuestas importantes y no se tenga nivel freático cerca de la superficie, se pueden desarrollar zonas de saturación producto de lluvias intensas y prolongadas. Estas zonas son conocidas en la bibliografía como frente húmedo (Suarez, 1998) y pueden eventualmente producir la falla del talud. Para simular esta condición, en el modelado se asignó una resistencia al corte no drenada.

Por medio del cálculo que se realiza con el método de Morgenstern y Price en el SLOPE/W®, se determinó el factor de seguridad mínimo de las numerosas superficies de falla generadas para cada una de las condiciones probables en cada uno de los taludes en estudio, el cual debió ser comparado con los valores establecidos en el cuadro 2.8 que aplicaban para los taludes en estudio, con lo cual se determina su estabilidad.

3.3.4.3. Proceso de calibración: retrocálculo y convergencia

Un aspecto de vital importancia en el modelado fue el proceso de calibración.

El proceso de calibración se realizó mediante el análisis de retrocálculo con el método basado en la geometría de la superficie de falla (Duncan et al., 2014). El objetivo de este análisis fue obtener mediante un proceso iterativo, los parámetros geotécnicos resistentes del suelo en el momento de la falla, de tal forma que el modelo utilizado correspondiera con un FS igual a 1,00, lo que significa que el proceso de calibración del modelo alcanzó la convergencia.

Para lograr la convergencia entre lo modelado y lo real se realizó un procedimiento de modelado y calibración en cada uno de los taludes en estudio en su condición geométrica previa a la falla, esto es, en la condición posterior a los trabajos de corte realizados entre los años 2011 y 2014 utilizando los parámetros físico-mecánicos obtenidos por diferentes técnicas. Estos parámetros se tomaron de los intervalos de valores resultantes de los ensayos realizados, con los cuales se obtuvieron los parámetros de resistencia c' y ϕ' iniciales mediante el proceso de retrocálculo. Con estos valores, que dieron resultados muy cercanos a la condición de convergencia, se realizó el proceso iterativo de calibración modificando y combinando las características geotécnicas, haciendo uso del programa SLOPE/W®, hasta obtener los valores de c' y ϕ' definitivos que reprodujeran la falla real del talud.

Al lograr la convergencia entre los resultados del modelo geométrico y la situación observada en el problema real, se logra la validación del modelo y se garantiza que el proceso de diseño y búsqueda de las medidas de estabilización más apropiadas sean realmente efectivos. Es importante que la superficie de falla generada mediante este procedimiento resulte similar a la condición final del deslizamiento real del terreno.

Una vez que se obtuvo el modelo calibrado, los parámetros resultantes de este proceso de calibración se utilizaron para modelar la ladera natural, con una topografía hipotética que existió, en las seis condiciones de análisis.

De la misma manera, se utilizaron los parámetros definitivos provenientes del proceso de calibración para modelar la propuesta de solución para cada uno de los taludes en estudio en las cuatro condiciones de análisis.

Las pruebas de resistencia al corte se realizaron a muestras inalteradas tomadas directamente de los taludes y en el proceso de calibración se emplearon como punto de partida los valores de resistencia obtenidos

directamente del ensayo, que corresponden con la resistencia pico. En el caso de los suelos residuales tropicales se conoce que, desde el punto de vista esfuerzo-deformación, la resistencia pico tiende a ser generalmente muy similar a la resistencia residual (Aburto & Rodríguez, 2012).

Debido a la complejidad y a la variabilidad de características que presentan los suelos en su estado natural, con este proceso de calibración se lograron validar los resultados. La complejidad de los suelos y rocas blandas radica en que muchos de los problemas de estabilidad de taludes llevan implícito situaciones complejas en cuanto a geometría, anisotropía, comportamiento no lineal, esfuerzos y la presencia de esfuerzos asociados como las presiones de poro y las cargas sísmicas (Romero, 2011).

Como los taludes en cuestión ya han fallado, las condiciones en el programa debieron reflejar las fallas que tuvieron lugar en la realidad y, por lo tanto, si no se obtenía el factor de seguridad igual a la unidad en el momento de modelar, se debían realizar iteraciones por medio de la modificación de los parámetros hasta lograr la convergencia entre lo que sucedió en la realidad y lo que se tenía en el modelo para, de esta manera, obtener finalmente la calibración el modelo.

Se logra calibrar el modelo cuando se llega finalmente al valor del factor de seguridad igual a la unidad, lo que significa que el modelo ha logrado la convergencia entre lo que se tiene en el programa y las condiciones de falla presentes en el talud real.

Se le da fin al proceso de calibración en el momento en que se logra la convergencia del modelo físico con la situación real que se está modelando. Una vez lograda la convergencia se está en condiciones de diseñar adecuadamente la solución de estabilización para el talud. Las propiedades físico mecánicas del modelo con el cual se logra la convergencia serán las que apartir de este momento se empleen en el proceso de modelación de la solución definitiva de estabilización.

3.3.5. Etapa de diseño y recomendaciones constructivas

Una vez lograda la convergencia mediante la calibración del modelo y ajustadas las propiedades del suelo de los tres taludes, se procedió a analizar las condiciones de los taludes para definir las diferentes propuestas de estabilización que se someterían a análisis.

Esta etapa se realizó a partir del modelado, así, al modelo calibrado se le introducen diferentes alternativas de soluciones de estabilización, hasta lograr una que se considere más apropiada.

3.3.5.1. Propuesta de solución

En este caso se valoró la implementación de modificaciones en las características geométricas que mejorarían la estabilidad de los taludes, además de la conformación de taludes y control de las aguas. De esta manera se aumentaría el valor del FS, lo que indica mayor seguridad de la estabilidad del macizo.

3.3.5.2. Modelo de la solución propuesta

Una vez definidas las propuestas de solución, se generó el modelo en el programa para su análisis, para lo cual se utilizaron los parámetros obtenidos del proceso de calibración y convergencia.

3.3.5.3. Revisión de criterios

Se analiza el modelo simulando cuatro condiciones que se consideran probables en el diseño (estática con nivel freático, estática sin nivel freático, estática con frente húmedo y pseudoestática). Se ajusta la solución hasta obtener una respuesta apropiada para las cuatro condiciones desde el punto de vista de factor de seguridad mínimo. De esta manera, se logra la solución de estabilidad del talud en estudio. De no cumplirse un criterio, se debe realizar nuevamente el modelado con una nueva propuesta y revisar para las mismas condiciones hasta que se cumplan los criterios.

3.3.5.4. Perfil geotécnico de la propuesta

El diseño de solución o propuesta se presenta con el perfil geotécnico típico. En el mismo se deben acotar las dimensiones geométricas, especificar los sistemas que se deben emplear, sus propiedades, e incluir cualquier otra información que se considere relevante.

Conclusiones parciales

La RN No. 856 ubicada, en la zona fronteriza norte, presenta una serie de taludes expuestos, se le ha realizado una serie de estudios, se le ha dado seguimiento y ha sido intervenida con el fin de construir una carretera. Esto ha generado una base de datos importante dentro de un contexto ideal de estudio, que ha posibilitado la elaboración de una metodología de análisis y diseño de estabilidad de taludes en suelos y rocas blandas característicos de zonas tropicales, como la de Costa Rica.

Se han investigado múltiples metodologías que abarcan el estudio de la estabilidad de los taludes a nivel nacional e internacional, en Costa Rica el aporte más importante en este sentido se concretó con la publicación del *Código Geotécnico de Taludes y laderas de Costa Rica* (2015). A partir del análisis de las diversas metodologías aplicables, se definió el grupo de invariantes fundamentales, que no son más que las etapas de obligado cumplimiento para realizar en los análisis de estabilidad de taludes, y, sobre esta base, se establece el marco metodológico de investigación a seguir en el contexto de suelos y rocas blandas que se aplica en este trabajo.

Se ha elaborado un procedimiento metodológico que se compone de las siguientes cuatro etapas básicas: estudios preliminares, estudio detallado, modelado y calibración del modelo geotécnico y diseño y recomendaciones constructivas. Dichas etapas se consideran de carácter obligatorio para proponer soluciones de estabilidad de taludes en suelos y rocas blandas.

CAPÍTULO 4 . ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este apartado se detallan los resultados obtenidos en el desarrollo de la investigación.

4.1. Caso de estudio: taludes en la RN No. 856, sección 1, tramo río Pocosol-río Infiernito

4.1.1. Etapa preliminar de investigación

4.1.1.1. Información preliminar

En esta etapa se obtiene información sobre la geología regional y se elabora un mapa con el programa Quantum Gis de QGIS (versión 2.4.0-Chugiak) bajo la Licencia Pública General GNU, el cual se muestra en la figura 4.1. En círculos rojos se marcan los tres taludes seleccionados para el estudio.

Geología regional

La región norte de Costa Rica, que incluye las llanuras de San Carlos y Guatuso, ha sido una de las menos estudiadas en detalle desde la perspectiva geológica en el territorio nacional (Gazel, Alvarado, Obando & Alfaro, 2005)

El área objeto de investigación está ubicada en la denominada paleo cuenca tectónica de San Carlos. Esta paleo cuenca está limitada por la cordillera volcánica de Tilarán al oeste y sur, por el Arco de Sarapiquí al este, y por el Río San Juan al norte. Los materiales geológicos presentes en esta zona son muy variados. Las rocas existentes en superficie son principalmente de carácter volcánico, así como depósitos recientes derivados de la dinámica efluviolacustre regional. Conforman el basamento de la llamada cuenca paleotectónica de San Carlos (Astorga, 1992) y está conformado por peridotitas serpentizadas, doleritas, gabros, basaltos toleíticos, radiolaritas y sedimentos tubidíticos volcanoclásticos. Se calcula una edad Cretácico Inferior al Cretácico Superior basal (Albaniano), lo que significa unos 100 millones de años.

El área de estudio está constituida básicamente por sedimentos de la Formación Machuca, Basaltos Mercedes, Riolutas Crucitas y sedimentos aluviales recientes. Los materiales presentan cuerpos intrusivos, mineralización secundaria, fallamiento y meteorización.

Arco del Sarapiquí

Las unidades volcánicas se describen como Formación Cureña, que se extiende a lo largo de la frontera con Nicaragua y está formada por estribaciones de la Cordillera Chontales, donde aflora a lo largo del río San Juan y en sus afluentes hacia el sur y el río Sarapiquí. Además, aflora en los cerros Cureña, Ochoa, Jardín, Machuca, Castillo entre otros. Conformado por andesitas augíticas e hipersténicas, brechas volcánicas y vetas de cuarzo auríferas (Astorga et al., 1991). Otros autores describen detalladamente esta unidad morfotectónica y la subdividen en al menos 9 unidades como se muestra en la figura 4.2, que incluyen basaltos, andesitas, intrusivos y depósitos piroclásticos (Gazel et al., 2005). Varios ejemplos de esta unidad afloran en la zona del trazado como: Formación Machuca, Riolutas Crucitas y Basaltos Mercedes. Su edad es determinada en el Mioceno Plioceno.

Formación Machuca

Definida por Hayes (1899), aflora en las riberas del río San Juan en el sector norte del arco. Existen afloramientos importantes en los primeros kilómetros del trazado del proyecto Infiernito-San Carlos. Se compone de intercalaciones de lutitas, limolitas y, en menor grado, areniscas finas, las cuales son generalmente gris azuladas, silicificadas, con ausencia de macrofósiles y de bioturbación.

La estratificación varía de mediana a fina (10 a 30 cm), de tipo ondulante con acunamientos laterales, gradación positiva, laminación paralela fina y estructuras de carga de las facies limolíticas o arenosas sobre las lutitas.

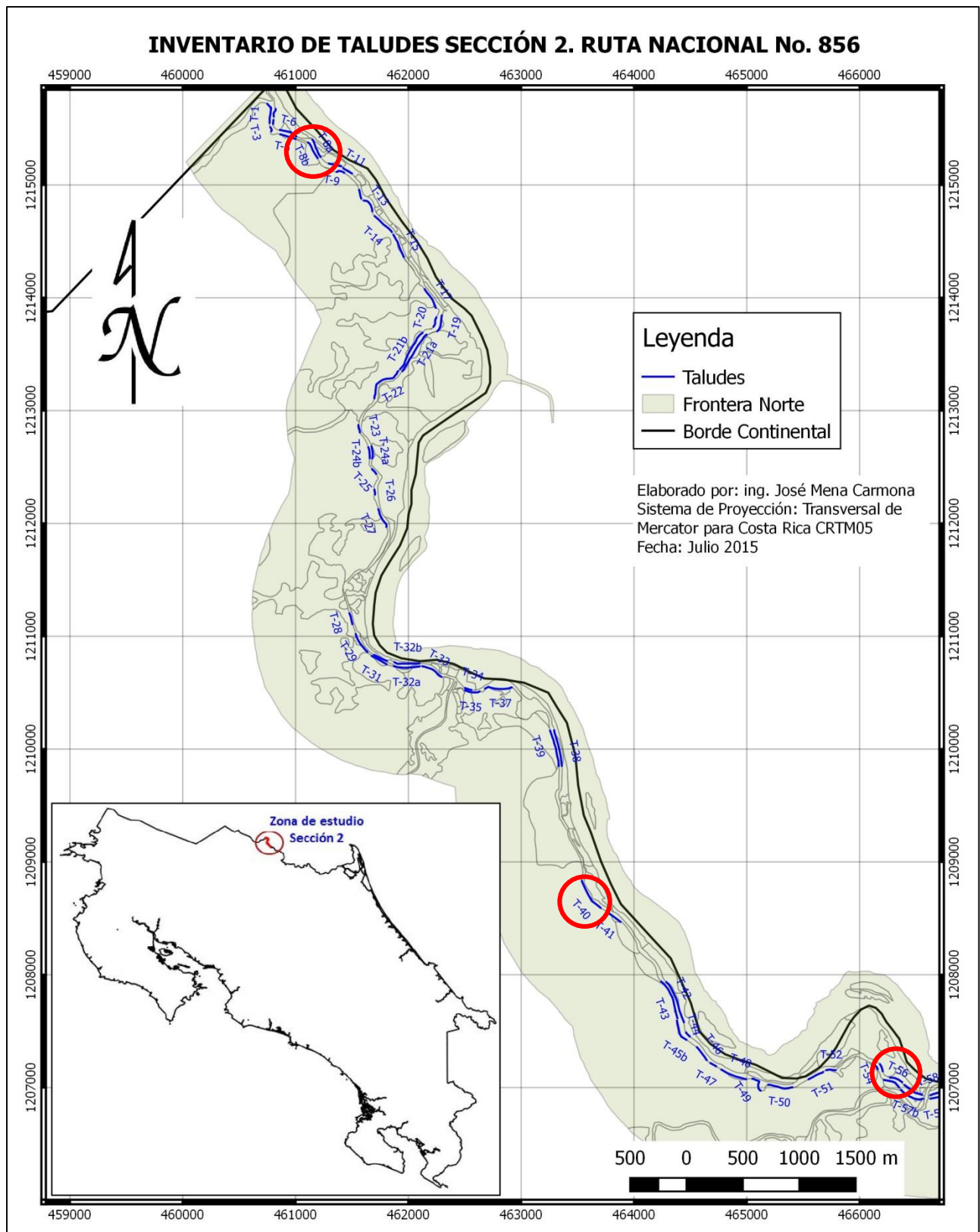


Figura 4.1. Inventario de taludes en la sección 2, RN No. 856

Fuente: Mende (2014)

Corresponden con turbiditas y otros depósitos de talud. En el lado nicaragüense son sobreyacidas por rocas volcanoclásticas del Oligoceno-Mioceno del Grupo Tamarindo y rocas volcánicas del Mioceno del Grupo El Coyol.

En el lado costarricense, estas rocas son sobreyacidas discordantemente por las rocas volcánicas del Arco de Sarapiquí. La edad de la Formación Machuca es de Paleoceno-Eoceno (Gazel et al., 2005).

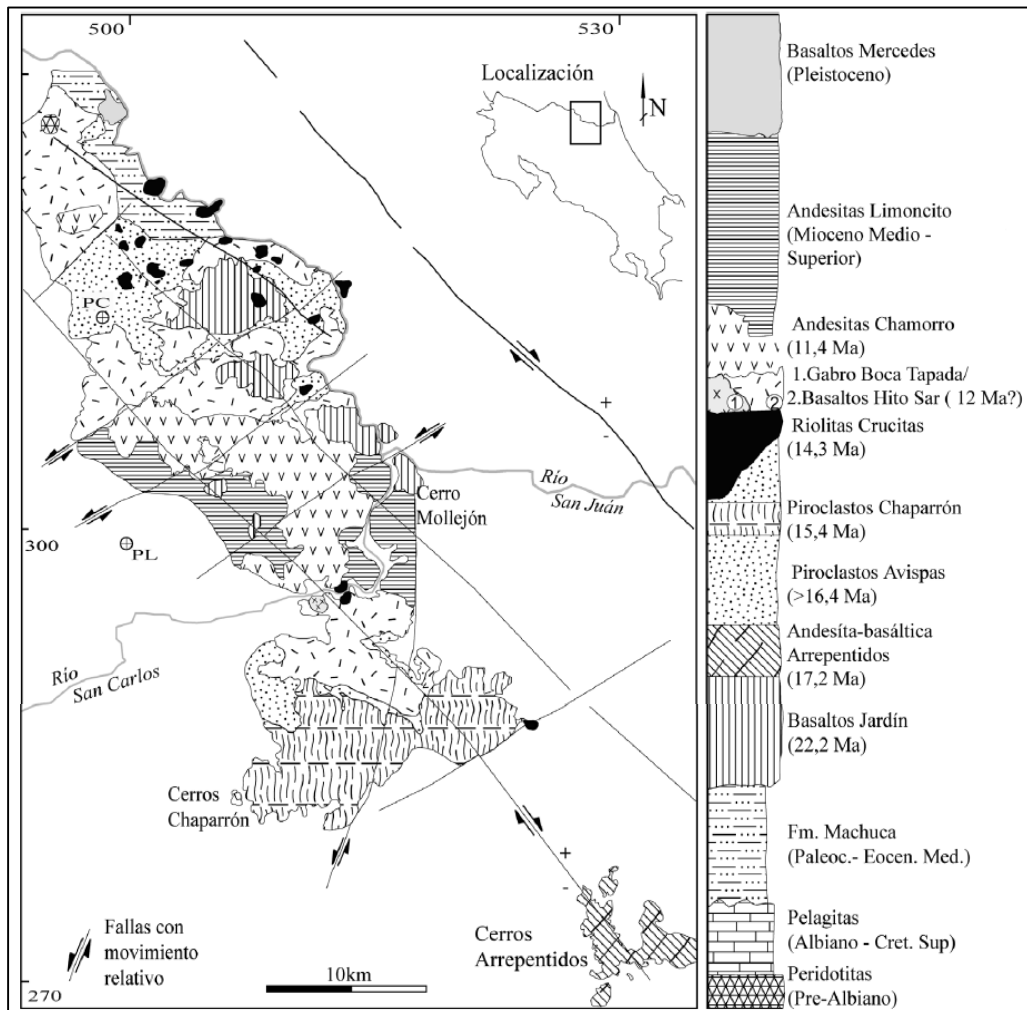


Figura 4.2. Mapa sinóptico de las principales litologías del Arco de Sarapiquí (modificado de Obando, 1995)

Nota: La columna estratigráfica a la derecha muestra las relaciones crono-estratigráficas de las diferentes unidades geológicas. El Arco de Sarapiquí incluye las unidades magmáticas del Mioceno (22,2-11,4 Ma), las litologías más antiguas representan el basamento y los Basaltos Cerro Mercedes son independientes a la evolución de este arco. En blanco se muestran las áreas con suelos volcánicos residuales y materiales aluviales no detallados en este trabajo. Fuente: Gazel et al (2005)

Riolitas Crucitas

Aflora en cerros aislados en la parte norte del arco; algunos de estos cerros son cortados o se encuentran cerca del trazado del proyecto Infiernito-San Carlos. Son dacitas a riolitas con anfíbol y/o biotita. La textura es hipocristalina-porfirítica, con fenocristales subhedrales de plagioclasa con zonación oscilatoria fuerte (hasta un 30 %), cuarzo reabsorbido (< 5 %), biotita (< 4 %), magnetita (< 3 %) y hornblenda verde (hasta un 10%) ocasionalmente opacitizada, con trazas de clinopiroxeno, apatito y circón. La matriz está

compuesta de vidrio café claro en proceso de desvitrificación y tiene una textura perlítica. Un espesor mínimo aflorante de esta unidad se puede estimar en 100 m. La edad K/Ar de esta unidad es Mioceno Medio tardío ($14,3 \pm 0,5$ Ma) (Gazel et al., 2005).

Basaltos Mercedes

Afloran en el sector norte del arco en el cerro Mercedes, al oeste del proyecto Infiernito-San Carlos. Está representado por basaltos alcalinos (basanita leucítica), constituidos por fenocristales de olivino idiomórfico con inclusiones de espinela cromífera en una matriz con abundante clinopiroxeno, plagioclasa y en menor cantidad leucita idiomórfica y augita titanífera. Estas lavas son ricas en xenolitos de peridotita, con estructura granuda-poligonal con juntas triples y sin foliación, constituida por olivino, ortopiroxeno, clinopiroxeno y espinela cromífera, que posiblemente representan una muestra del manto actual existente bajo Costa Rica. Esta unidad presenta un espesor de 350 m. Tanto las basanitas como los xenolitos están frescos, lo que permite inferir una edad pleistocena para esta unidad (Gazel et al., 2005).

4.1.1.2. Inspección visual de campo

Geología local

El levantamiento geológico permitió caracterizar los taludes que fueron objeto de evaluación rápida y, con su análisis, complementar la información geológica.

Se observaron en total 62 taludes, de los cuales 45 eran de corte y 17, de relleno, con alturas que oscilan entre los 5 y 20 m, longitudes que comprenden de 60 hasta 200 m, y la mayoría presenta características geotécnicas similares.

Este estudio se enfocó en los taludes de corte. Con la inspección visual se determinó que los 45 taludes de corte poseen potencialidad de inestabilidad, debido a que los materiales rocosos de que se componen se comportan básicamente como suelos a causa de su alto grado de alteración o intemperismo. Estos taludes son representativos de las condiciones geólogo-geotécnicas de la zona. En general, poseen alto fracturamiento y degradación de la matriz rocosa, en correspondencia con macizos de calidad regular a mala.

Los materiales de los taludes objeto de estudio son de origen efusivo sedimentario y poco consolidados, con alteraciones hidrotermales y muy intemperizados. Estos materiales fueron diferenciados en capas de suelos y rocas blandas principalmente con base en su grado de intemperismo.

4.1.1.3. Selección de los taludes objeto de estudio

Se seleccionaron para este estudio tres taludes de la sección río Pocosol-río Infiernito, denominados T-8a, T-40 y T-56; éstos aparecen señalados en el mapa con círculos rojos, tal como se muestra en la figura 4.1. En la figura 4.3 se observan las fotografías de estos tres taludes.

Estos taludes presentaron potencialidad de inestabilidad debido a que son suelos con alto grado de alteración; además, con la inspección visual se comprobó que el tratamiento del drenaje y los cortes que se les habían realizado no fueron adecuados.

En el caso particular del talud T-8a, éste se seleccionó porque es un talud que ha fallado constantemente desde el año 2012. Ha estado expuesto a factores externos, principalmente de intervención antrópica. Sin haber llevado a cabo estudios geotécnicos, se han realizado trabajos de drenaje como cunetas, canales y limpieza. Además, cuando llueve sufre desprendimientos de material, produciendo deslizamientos de rotación. Aunado a esto, el talud presenta una pendiente propicia para que el ganado transite constantemente sobre la cima.

Con respecto al talud T-40, desde el mes de noviembre del año 2012 aproximadamente, se ha venido observando y se ha determinado su comportamiento. De la misma manera que el talud T-8a, este talud ha

sido intervenido por el hombre; se aplicó siembra de semilla por el método hidráulico, se colocó una cubierta de fibra de coco y se construyeron cunetas. A pesar de ello, con el paso del tiempo, se observaron deslizamientos rotacionales importantes, con la forma de cuchara típica de los suelos tropicales y con un escarpe principal considerable, de lo cual se concluyó que los trabajos realizados, también sin estudios previos, no produjeron los efectos esperados.

El talud T-56 tiene las mismas características que el talud T-40, también se observaron deslizamientos de rotación, pero a diferencia de los otros dos taludes, éste no se ha intervenido luego de que se realizara el corte durante el proceso constructivo del año 2011.

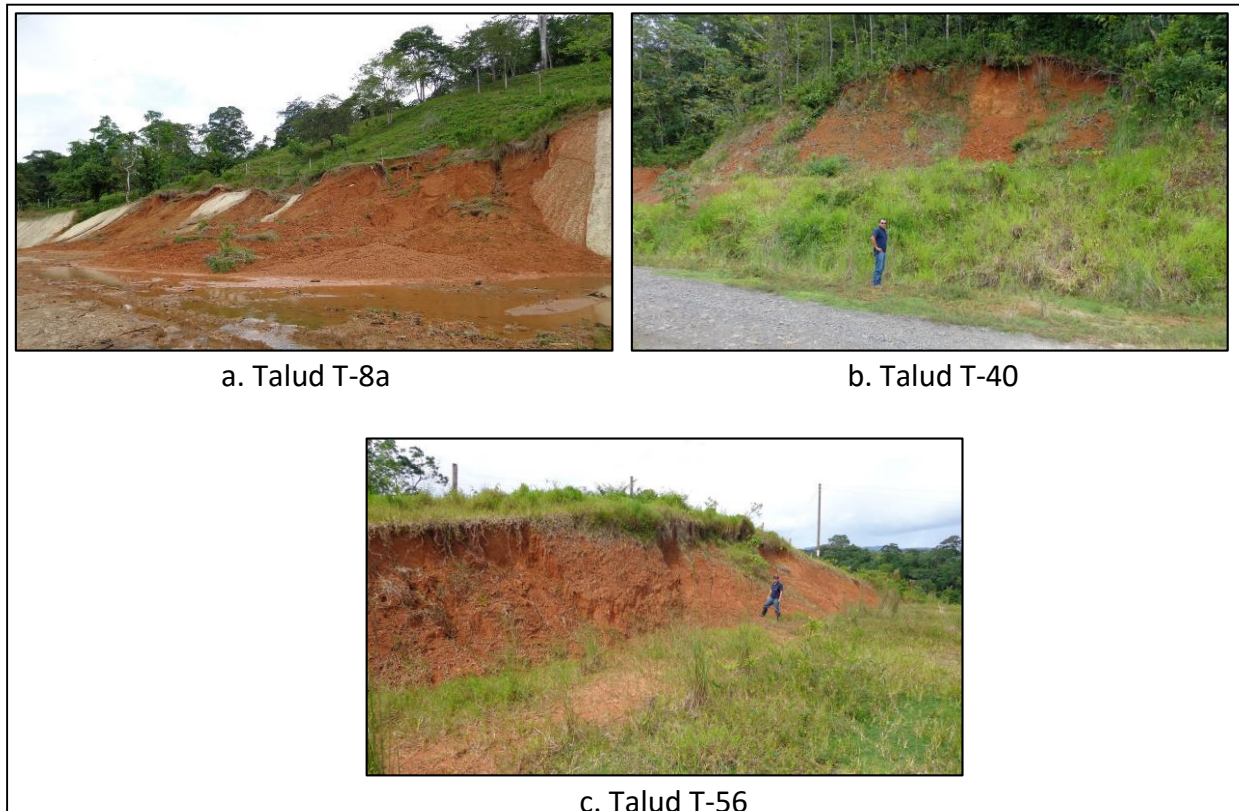


Figura 4.3. Taludes seleccionados para el estudio

Fuente: El autor Fecha: noviembre 2014

A continuación se describen las características geotécnicas generales observadas en cada uno de los tres taludes seleccionados.

Talud T-8a

Este talud presenta una geología de turbiditas de edad de Eoceno a Paleoceno, aparente resistencia reducida debido a las condiciones climáticas intensas, de fuertes lluvias y alto grado de humedad relativa, así como las altas temperaturas. En su lado derecho se evidencia que se colocó geosintético con fibra de coco, con un espesor de suelo residual de 2,00 m de color rojizo y con características limosas. Los sedimentos turbidíticos que le subyacen están muy alterados. Este talud tiene un desprendimiento en masa, causado por el afloramiento del nivel freático. Había sido intervenido y se habían colocado cunetas de drenaje y canaletas, que fueron insuficientes para drenar y estabilizar el talud.

En la figura 4.4 se muestra la ficha de observación para este talud.


06. Ficha de descripción rápida de taludes			
TALUD T-8a			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas	E	N	<p>Lado Derecho: El talud posee hidrosiembra y geotextil con fibra de coco. El espesor de suelo residual es de 0,5 m a 1,0 m; de color rojizo y características limosas. Los sedimentos turbidíticos que le subyacen poseen estratificación oblicua con buzamiento entre 30°-40°. Se observa agrietamiento por descompresión.</p> <p>Lado Izquierdo: Sin intervención</p> <p>En este talud se aprecia un deslizamiento de masa de mediana magnitud. En este caso, a las complejidades geológicas del sitio, se suma la presencia de nivel freático con surgencias de agua. El talud había sido intervenido y se habían colocado cunetas de drenaje y canaletas que fueron insuficientes para drenar y estabilizar el talud</p> <p>Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización</p>
CRTM05	461148	1215311	
Altura Talud	± 2,5 de a 10,0	m	
Longitud	300	m	
Litología	Turbidita		
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	
	Nivel		
Meteorización	V-VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?	X		
Rasgos erosivos y otras observaciones	Erosión leve en superficie		
FOTOGRAFÍA			
			
<p>I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual</p>			


Figura 4.4. Ficha de observación, talud T-8a

Talud T-40

Se aprecia 1,0 m de suelo residual con características limosas. El material subyacente es una turbidita muy alterada. Con coloración más rojiza, se evidencia deslizamiento de material en casi todo el talud, de 4,0-5,0 m en la sección frontal. La pendiente del talud está entre 60°-65°. Se protegió el talud con una malla con fibra de coco, se practicó la hidrosiembra y su comportamiento es muy malo. En la figura 4.5 se muestra la ficha de observación para este talud.

34. Ficha de descripción rápida de taludes			
TALUD T-40			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas	E	N	Se aprecia 1,0 m de suelo residual con características limosas. El material subyacente es una turbidita muy alterada.
CRTM05	463654	1208617	
Altura Talud	± 4-7	m	Coloración más rojiza, se evidencia deslizamiento de material en casi todo el talud. Deslizamiento de 4,0-5,0 m en la sección frontal del talud. La pendiente del talud está entre 60°-65°
Longitud	300	m	
Litología	Turbidita		Se hace limpieza al pie del talud y se producen deslizamientos. Se protege el talud con una malla con fibra de coco; se practica la hidrosiembra y su comportamiento es muy malo.
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	Nota: No hay contra-cuneta.
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	Alto	---	Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización
	Nivel		
Meteorización	V-VI		Suelo residual
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	Fotografía
Apto geofísica?	X		
Rasgos erosivos y otras observaciones	Surcos, cárcavas de erosión leves y deslizamientos de masa		

FOTOGRAFÍA



I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual

Figura 4.5. Ficha de observación, talud T-40

Talud T-56

Tiene espesor de suelo residual hasta 1,00 m. Presenta características limosas y color rojizo. Por debajo del espesor de suelo se encuentra una turbidita. Se puede apreciar laminación muy fina, tanto centimétrica como decimétrica y manchas de oxidación negras y rojizas. El color predominante del talud es rojizo. La pendiente del talud es de 60° y en los *conus talus* los sedimentos presentan ángulo de reposo de 30°. En la figura 4.6 se muestra la ficha de observación para este talud.

45. Ficha de descripción rápida de taludes			
TALUD T-56			Rasgos geológicos Espesor de suelo residual hasta 0,30 m - 0,50 m. Presenta características limosas y color rojizo . Por debajo del espesor de suelo, se encuentra una turbidita. Se pueden apreciar los clastos muy alterados y subredondeados. La pendiente del talud es de 60° y en los <i>conus talus</i> los sedimentos presentan ángulo de reposo de 30°. Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas	E	N	
CRTM05	466311	1207073	
Altura Talud	± 5	m	
Longitud	300	m	
Litología	Turbidita		
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	
	Nivel		
Meteorización	V-VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?	X		
Rasgos erosivos y otras observaciones	Cárcavas de erosión, <i>conus talus</i> y deslizamientos pequeños		
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			

Figura 4.6. Ficha de observación, talud T-56

4.1.1.4. Volúmenes de trabajo por talud

En el cuadro 4.1 se muestra el volumen de trabajo realizado en cada uno de los taludes en estudio. Una parte de las muestras obtenidas fue evaluada exclusivamente a partir de la clasificación tacto-visual. La determinación de estos parámetros permite determinar tanto la caracterización geotécnica de las capas de suelo como el modelo geotécnico.

Cuadro 4.1. Resumen de los volúmenes de ensayos realizados a los tres taludes en estudio

Talud	Clasificación	Geofísica	Perforación	Ensayos físicos					Ensayos de resistencia	
	RMR	Sísmica de refracción (m)	SPT	Granulometría	Plasticidad	Humedad	yd	Gs	Corte directo (CD)	Corte directo (UU)
T-8a	3	160	2	7	7	35	7	7	3	3
T-40	3	160	3	11	11	57	11	11	3	3
T-56	3	160	2	5	5	44	5	5	2	2

4.1.2. Etapa detallada de la investigación

4.1.2.1. Clasificación geomecánica de Bieniawski (RMR)

Resistencia de la matriz rocosa

Haciendo uso del martillo del geólogo, se estimó en general la resistencia de la matriz rocosa de los taludes con presencia de turbiditas entre 2 MPa y 5 MPa, en algunos casos se alcanzaron valores de entre 5 MPa y 10 MPa. Estos valores confirman que la resistencia de la roca es baja o moderada y, en la mayoría de los casos, se comporta como suelo. Esta situación obedece al tectonismo, hidrotermalismo e intemperismo que ha afectado a la roca. En la figura 4.7 se muestra una sección evaluada.



Figura 4.7. Área de afloramiento evaluada para RMR

RQD

Los afloramientos evaluados exhiben un fracturamiento significativo, debido al tectonismo. El RQD es variable, generalmente menor al 10 %. De acuerdo con estos valores de RQD, la calidad de la roca clasifica como muy mala de acuerdo con el cuadro 2.4.

Separación de fracturas

La separación entre fracturas en la roca es variable en el orden de 1 cm a 5 cm y de 12 cm y 25 cm. El número de familias suele ser de 3 a 4 por afloramiento rocoso.

Estado de las fracturas

Las fracturas analizadas de los taludes estudiados mostraron, por lo general, longitudes entre 1 m y 3 m, en algunos casos inferiores a 1 m. Las aberturas oscilaban entre 1 mm y 1,2 mm. La rugosidad se clasificó como ligera a rugosa. Se observó rellenos blandos de arcilla o mineralización secundaria y alteración moderada de las superficies de fractura menores a 5 mm, en algunos casos mayores a 5 mm. Algunas grietas en basaltos aparecían soldadas con calcita y cuarzo. En cuanto a la alteración, se clasificaron como ligeramente alteradas.

Nivel freático

Los taludes se encontraban en las zonas altas por lo que generalmente estaban secos, aunque en la base poseían evidencias de humedad. En este caso, el talud T-8a presentó condiciones de afloramiento de agua en la capa 2.

Corrección por orientación de las discontinuidades

La corrección fue realizada considerando la familia predominante de fracturas y su orientación con respecto a los otros taludes. En la mayoría de los casos las discontinuidades presentaban una condición regular. En el cuadro 4.2 se muestra el detalle de la clasificación del macizo rocoso.

Cuadro 4.2. Valores de clasificación geomecánica de Bieniawski (1989) para los taludes en estudio

Parámetros de clasificación	TALUD T-8a		TALUD T-40		TALUD T-56	
	Clasificación	Valor	Clasificación	Valor	Clasificación	Valor
1. Resistencia martillo de geólogo (Mpa)	5-25	2	5-25	2	1-5	1
2. Índice RQD (%)	< 25	3	< 25	3	< 25	3
3. Separación de fracturas (cm)	< 6	5	6-20	8	6-20	8
4. Estado de las fracturas						
Longitud de la discontinuidad (m)	1-3	4	< 1	6	< 1	6
Abertura (mm)	1-5	1	nada	1	1-5	1
Rugosidad	Ligeramente rugosa	3	Ligeramente rugosa	3	Ligeramente rugosa	3
Relleno	Relleno Blando < 5 mm	2	Relleno Blando < 5 mm	2	Relleno Blando > 5 mm	0
Alteración	Ligeramente alterada	5	Ligeramente alterada	5	Ligeramente rugosa	5
5. Agua freática	seco	15	seco	15	seco	15
Corrección por discontinuidades (Taludes)	Regular	-25	Regular	-25	Regular	-25
PUNTUACIÓN RMR	15		20		17	

En el cuadro 4.3 se muestra la determinación de la clase de los taludes en estudio.

Cuadro 4.3. Determinación de la clase del macizo rocoso

Sitio	Clasificación RMR	Clase de talud
T-8a	15	V - Muy Mala
T-40	20	V - Muy Mala
T-56	17	V - Muy Mala

Los taludes analizados se clasifican, según el método RMR, como de calidad muy mala. La principal característica que controla este resultado es el diaclasado tectónico que presentan las rocas generalmente blandas y la presencia del factor de meteorización por arcillitización e hidrotermalismo.

La clasificación geomecánica RMR de Bieniawski (1989) permite ser utilizada como referencia para inferir las propiedades físico mecánicas del macizo rocoso (Edelbro, 2003). Este mismo concepto se maneja en el programa RocData 3.0®, que establece estas correlaciones a partir del valor del GSI, la resistencia a la compresión uniaxial, el peso específico de la roca y la altura del talud.

La estimación del comportamiento del macizo rocoso con el RocData 3.0® se muestra en el cuadro 4.4 y en el Apéndice 4 se muestran los ficheros de salida del programa. De esta forma quedaron establecidos los valores de cohesión y fricción para el macizo evaluado.

Cuadro 4.4. Propiedades físico mecánicas estimadas del macizo rocoso

Talud	Capa	Valor RMR promedio	Correlaciones			
			R _{compr}	γ_h	c'	ϕ'
			(MPa)	kN/m ³	(kPa)	(grados)
T-8a	2	15	2 - 5	19,00	24	29
T-40	4	20	5 - 10	21,00	37	38
T-56	2	17	2 - 5	18,00	22	31

4.1.2.2. Sísmica de refracción

A partir del estudio geofísico de refracción sísmica se obtuvieron las velocidades de ondas primarias de los taludes en estudio. Lo cual permitió determinar el perfil geotécnico y evaluar de forma indirecta las propiedades físicas y mecánicas de las diferentes capas de suelos y estratos de roca.

Talud T-8a

El cuadro 4.5 presenta los resultados de la interpretación sísmica realizada en el sitio.

Cuadro 4.5. Resultados del perfil sísmico en el sitio del talud T-8a

Capas	Vp (m/s)	Espesor (m)	Correlación geológica
1	430 – 610	4 - 9	Suelos y sedimentos turbidíticos meteorizados
2	2 630 – 3 220	-	lavas basálticas

Fuente: GeoStratu Consultores S.A.

Los resultados indican que en la profundidad de investigación hay materiales asociados con depósitos turbidíticos meteorizados y un basamento de roca dura asociada a lavas basálticas.

Las figuras 4.8 y 4.9 representan los perfiles geofísicos obtenidos a partir de los valores de velocidades sísmicas calculadas para el sitio sobre el talud T-8a.

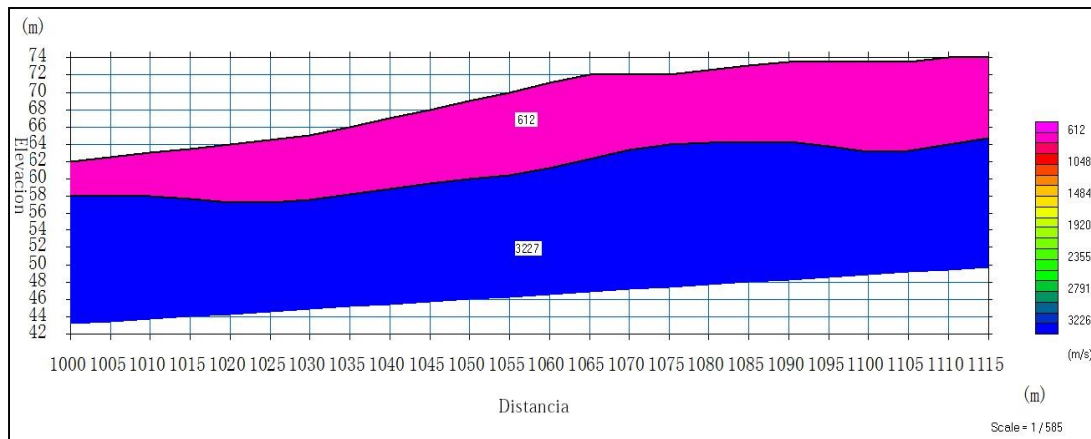


Figura 4.8. Perfil de sísmica de refracción longitudinal E-O al talud T-8a
Fuente: GeoStratu Consultores S.A.

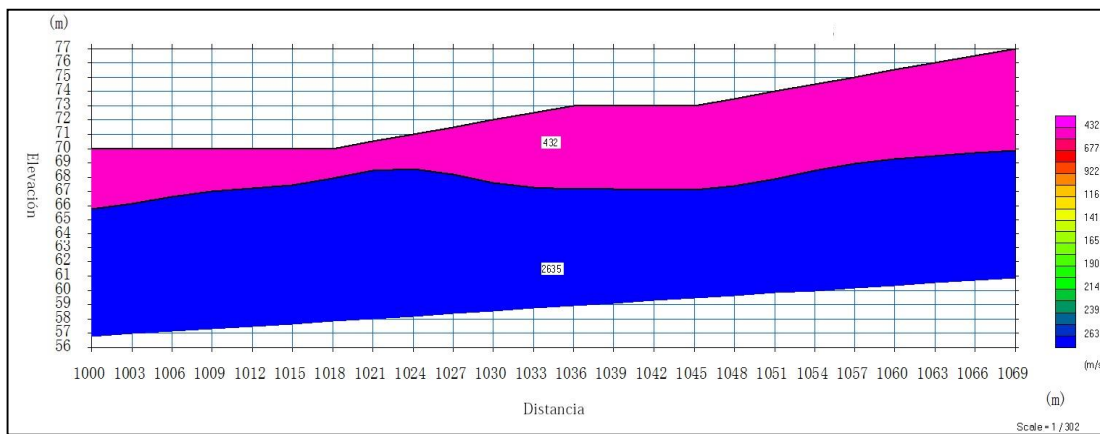


Figura 4.9. Perfil de sísmica de refracción transversal N-S al talud T-8a
Fuente: GeoStratu Consultores S.A.

En el cuadro 4.6 se muestran los resultados de las propiedades sísmicas de las capas.

Cuadro 4.6. Propiedades sísmicas del talud T-8a

Datos	Módulo 1	Módulo 2
Onda P (m/s)	2 635	3 227
Onda S (m/s)	1 400	1 800
Densidad (Kg/m ³)	2 300	2 500
Razón de Poisson	0,3	0,29
Módulo de Young (ton/cm ²)	119,85	213,55
Módulo de cizalle (ton/cm ²)	46	82,65
Correlación	Lavas	Lavas
Dureza (Caterpillar)	D11	D12

Fuente: GeoStratu Consultores S.A.

De acuerdo con el cuadro 4.6, por la relación V_p/V_s se puede determinar mediante correlaciones de distintos autores, que el valor de ϕ tiene un valor cercano a los 15° en la capa 1 y 30° en la capa 2, datos que se utilizan en el proceso de calibración (Manilla, Garnica & Pérez, 2003).

Las zonas con velocidad de onda baja de capa superficial en contacto con zonas de alta velocidad de onda pueden estar asociadas a superficies de falla potencial.

Talud T-40

El cuadro 4.7 resume los resultados de la interpretación sísmica realizada en el sitio.

Cuadro 4.7. Resultados del perfil sísmico en el sitio del talud T-40

Capas	V_p (m/s)	Espesor (m)	Correlación geológica
1	300 - 410	3 - 10	Bloques de lavas fracturadas y sedimentos turbidíticos meteorizados
2	700 - 870	6 - 14	lavas basálticas fracturadas
3	1 630 - 2 800	-	lavas basálticas

Fuente: GeoStratu Consultores S.A.

Los resultados indican que a la profundidad de investigación estudiada hay materiales asociados con depósitos turbidíticos meteorizados que constituyen un flujo de lavas basálticas. En los perfiles se logran diferenciar tres capas con velocidades de onda diferentes.

Las figuras 4.10 y 4.11 representan el perfil geofísico obtenido a partir de los valores de velocidades sísmicas calculadas del trabajo realizado para el sitio sobre el talud T-40. Ambos perfiles se realizaron sobre los extremos este y oeste de la elevación o talud.

No fueron identificadas zonas anómalas de baja velocidad asociadas con zonas de fracturas o fallas en los taludes.

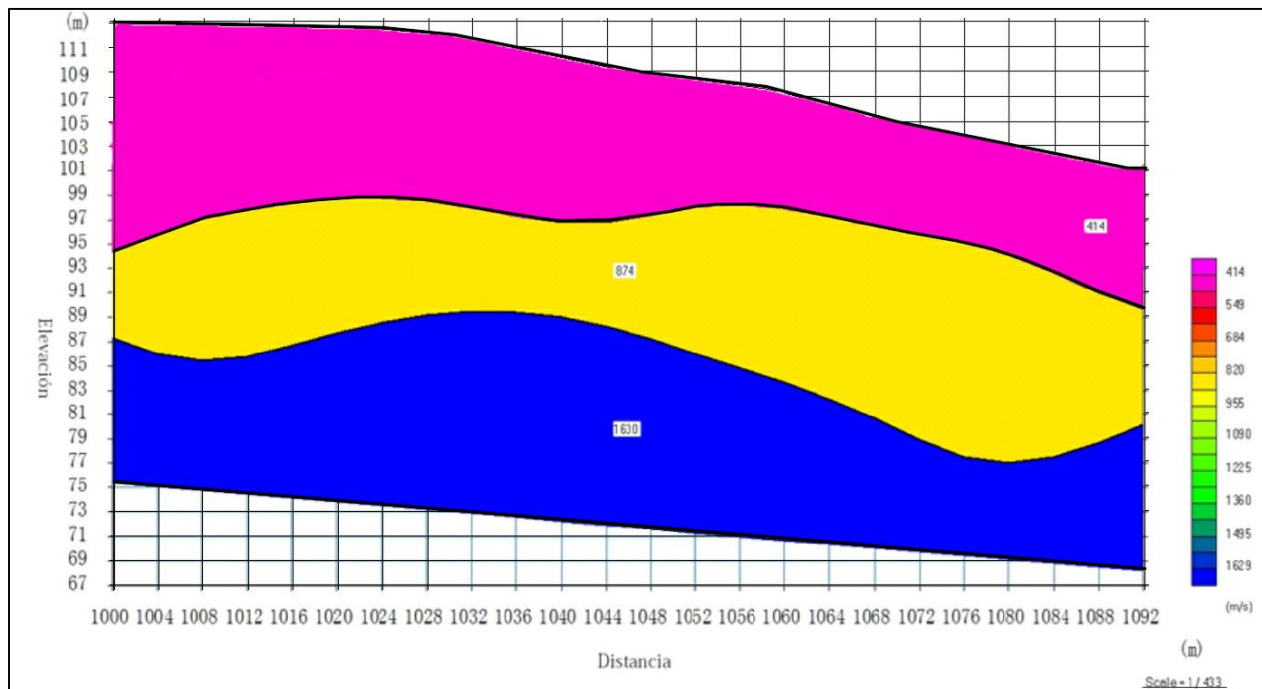


Figura 4.10. Perfil de sísmica de refracción extremo este, Talud T-40

Fuente: GeoStratu Consultores S.A.

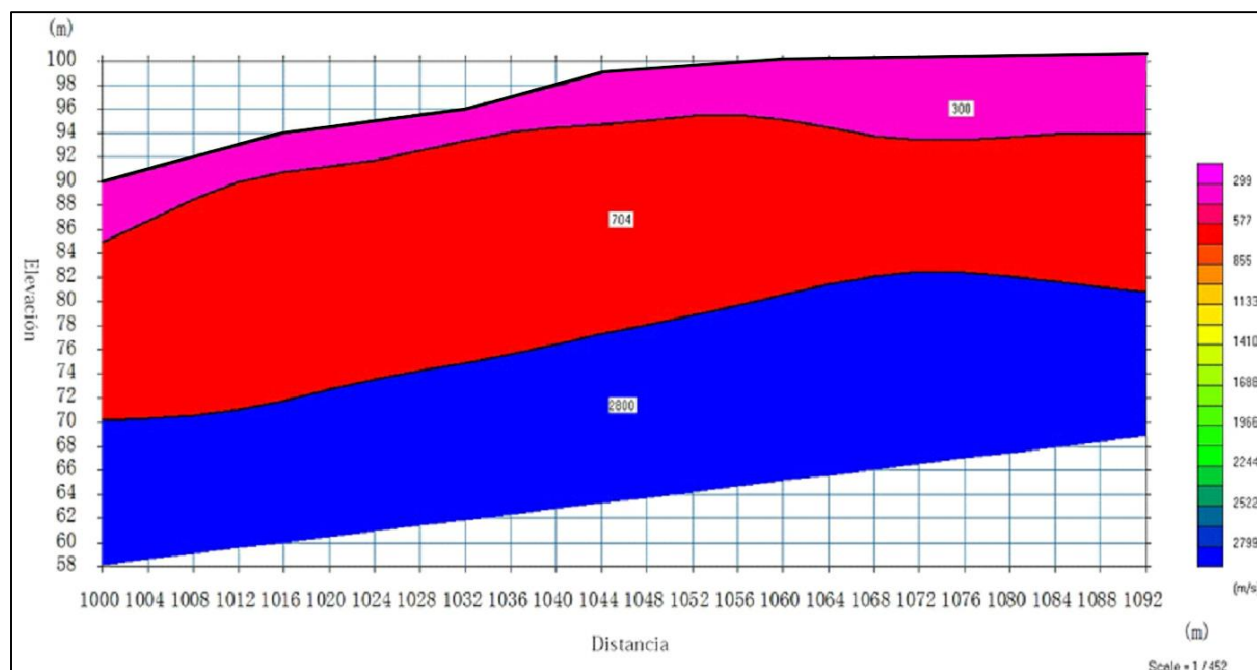


Figura 4.11. Perfil de sísmica de refracción extremo oeste, Talud T-40

Fuente: GeoStratu Consultores S.A.

El cuadro 4.8 resume los resultados de las propiedades sísmicas de las capas.

Cuadro 4.8. Propiedades sísmicas del talud T-40

Datos	Modelo 1	Modelo 2
Onda P (m/s)	1 630	2 800
Onda S (m/s)	800	1 450
Densidad (Kg/m ³)	1 900	2 300
Razón de Poisson	0,34	0,31
Módulo de Young (ton/cm ²)	33,27	129,89
Módulo de cizalle (ton/cm ²)	12,4	49
Correlación	Lavas	Lavas
Dureza (Caterpillar)	D8	D12

Fuente: GeoStratu Consultores S.A.

De acuerdo con el cuadro 4.8, por la relación V_p/V_s se puede determinar, mediante correlaciones de distintos autores, que el valor de ϕ tiene un valor cercano a los 15° en la capa 1 y 25° en la capa 2, datos que se utilizan en el proceso de calibración (Manilla et al., 2003).

Talud T-56

El cuadro 4.9 resume los resultados de la interpretación sísmica realizada en el sitio.

Cuadro 4.9. Resultados del perfil sísmico en el sitio del talud T-56

Capas	Vp (m/s)	Espesor (m)	Correlación geológica
1	530 -710	5 - 9	Suelos y sedimentos turbidíticos meteorizados
2	2 770 - 3 220	-	Lavas basálticas

Fuente: GeoStratu Consultores S.A.

Los resultados indican que en la profundidad de investigación hay materiales asociados con depósitos turbidíticos meteorizados, con un basamento de roca lávica dura a profundidad.

Las figuras 4.12 y 4.13 representan los perfiles geofísicos obtenidos a partir de los valores de velocidades sísmicas calculadas del trabajo realizado para el sitio sobre el talud T-56.

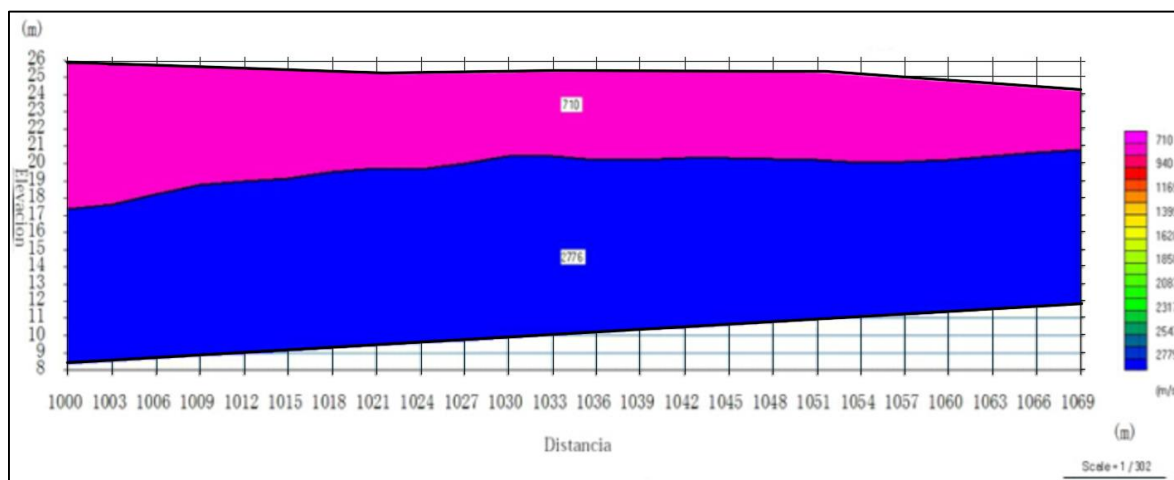


Figura 4.12. Perfil de sísmica de refracción longitudinal E-O al talud T-56

Fuente: GeoStratu Consultores S.A.

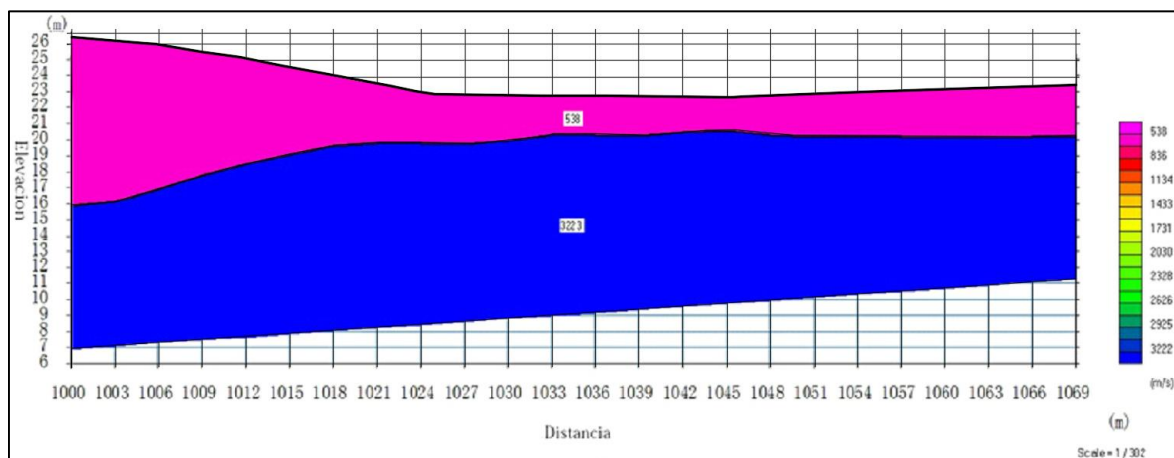


Figura 4.13. Perfil de sísmica de refracción Transversal N-S al talud T-56

Fuente: GeoStratu Consultores S.A.

El cuadro 4.10 resume los resultados de las propiedades sísmicas de las capas.

Cuadro 4.10. Propiedades sísmicas del talud T-56

Datos	Modelo 1	Modelo 2
Onda P (m/s)	2 776	3 223
Onda S (m/s)	1 500	1 800
Densidad (Kg/m ³)	2 500	2 500
Razón de Poisson	0,29	0,29
Módulo de Young (ton/cm ²)	148,46	213,55
Módulo de cizalle (ton/cm ²)	57,39	82,65
Correlación	Lavas	Lavas
Dureza (Caterpillar)	D11	D12

Fuente: GeoStratu Consultores S.A.

Esta capa presenta mayor cercanía entre Vs y Vp, lo cual indica que el material tiende a ser más rígido, por lo que el valor de ϕ tiende a ser mayor.

A partir de los valores obtenidos en los taludes estudiados y de acuerdo con los estudios geofísicos realizados por Barton (2008) sobre las calidades de los macizos rocosos, se pueden clasificar los mismos como de calidad pobre a muy pobre.

La interpretación de los 6 perfiles geofísicos en los sitios explorados permite establecer tres capas geofísicas que agrupan varias capas geotécnicas, para las cuales se establecen sus propiedades a partir de las propuestas de Barton. Este autor reconoce que existen buenas correlaciones para obtener las propiedades de la roca para un modelo de comportamiento Mohr-Coulomb a partir de las velocidades de onda primaria. Los valores de las propiedades de las capas geofísicas aparecen en el cuadro 4.11. En general, las velocidades de onda bajas corresponden con litologías inestables y sólo con velocidades de onda por encima de 700 m/s los materiales son más estables y permiten taludes más empinados, o saldar alturas mayores con iguales pendientes.

Las técnicas de caracterización geofísica permitieron evaluar capas subyacentes de lavas basálticas identificadas en los trabajos geológicos, pero no fueron caracterizadas por medio de la clasificación geomecánica del macizo rocoso, RMR.

Cuadro 4.11. Velocidades de onda y propiedades por capa geofísica

N	Capas geofísicas	Capas geotécnicas	V _p	γ_h	c	ϕ
			(m/s)	kN/m ³	(kPa)	(grados)
1	Suelos y tobalítica meteorizada	1, 2 y 3	300 – 610	17,00 – 20,00	22 - 28	20 - 29
2	Lava basáltica fracturada y meteorizada	4, 5 y 6	700 – 870	22,00 – 23,00	30 - 36	28 - 35
3	Lava basáltica	7	1 630 – 3 220	23,00	45 - 65	38 - 44

Fuente: GeoStratu Consultores S.A.

4.1.2.3. Ensayo de penetración SPT

Todos los ensayos de SPT realizados a cada uno de los taludes en estudio tienen su registro de perforación con la información por capa. Estos registros se encuentran en el Apéndice 3. Con estos resultados se generan los perfiles para su posterior análisis, así como la determinación de las características físicas y aplicación de las correlaciones que permiten obtener resultados de propiedades mecánicas del suelo.

En las figuras 4.14, 4.15 y 4.16 se muestran fotografías en una de las zonas de perforación para los ensayos de SPT que se realizaron en los tres taludes. Al lado de cada fotografía se presentan las muestras obtenidas de las boquillas a cada 0,50 m con el fin de observar la condición de los materiales.



Figura 4.14. Zona de perforación y muestra de suelos, talud T-8a

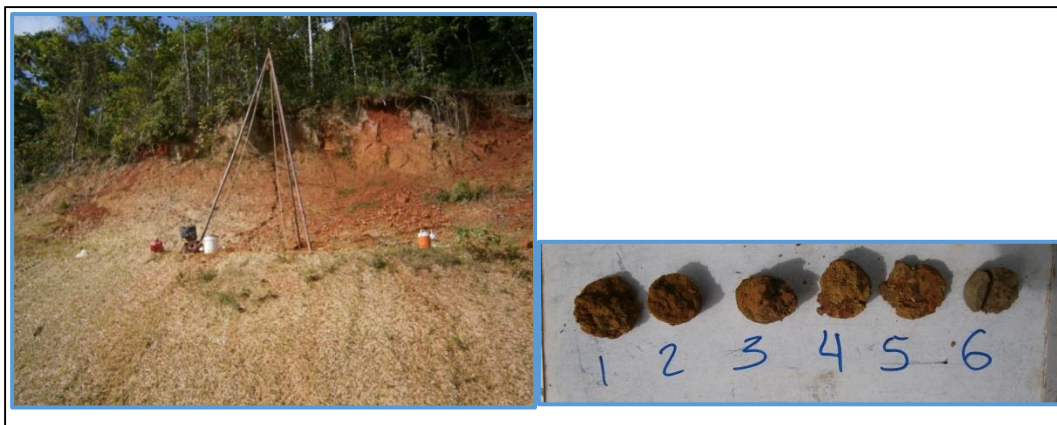


Figura 4.15. Zona de perforación y muestra de suelos, talud T-40



Figura 4.16. Zona de perforación y muestra de suelos talud T-56

En el cuadro 4.12 se muestran los resultados obtenidos de la cantidad de capas y profundidad en metros de las mismas, de cada uno de los ensayos de SPT realizados en los taludes en estudio.

Cuadro 4.12. Resultados de las perforaciones con el ensayo SPT en los taludes en estudio

Talud	Sitio	Cantidad de capas	Coordenadas CRTM05		Metros Perforados SPT
			E	N	
T-8a	T-8a.1. SPT 1	4	461337	1214861	10,00
	T-8a.2. SPT 2	3	461348	1215136	7,50
T-40	T-40.1 SPT 1	3	463868	1208455	3,00
	T-40.2 SPT 2	4	463849	1208462	9,50
	T-40.3 SPT 3	4	463855	1208445	16,00
T-56	T-56.1 SPT 1	3	466524	1206921	13,00
	T-56.2 SPT 2	2	466530	1206909	9,00

4.1.2.4. Toma de muestras inalteradas

Las muestras inalteradas son bloques extraídos de 200x200x200 mm, cubiertos con parafina y transportados cuidadosamente en cajones de madera con las medidas del bloque de suelo extraído. Estas muestras se obtuvieron a cielo abierto de las diferentes capas de suelo previamente determinadas con el ensayo SPT. En la figura 4.17 se ilustra una muestra extraída proveniente del talud T-40, específicamente en la capa 2.



Figura 4.17. Muestra inalterada #2 en capa 2, talud T-40

4.1.2.5. Caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos y rocas blandas

Descripción de las capas geotécnicas

A partir del ensayo de perforación y muestreo con SPT, se determinan las diferentes capas geotécnicas. La información obtenida se correlaciona con la información proveniente de los demás ensayos realizados como lo son el RMR, la sísmica de refracción, el corte directo y la observación visual durante los recorridos que se realizaron en el tramo en estudio.

Cabe mencionar que la técnica de RMR no aportó diferencias significativas entre los taludes analizados. De igual forma, por su mala calidad, estos taludes se comportan predominantemente como suelos y, en ese sentido, se le asignan parámetros de resistencia Mohr-Coulomb.

Los materiales de los taludes están representados por una capa de suelo superficial y las demás capas por rocas blandas que se comportan como suelos generalmente limosos. Los resultados de los ensayos de granulometría y clasificación de suelos se muestran en el Anexo 3 y los resultados de las perforaciones se muestran gráficamente en el Apéndice 3.

Capa 1: Material eluvial-deluvial, representado por un limo de alta plasticidad. Color rojizo a café en ocasiones con colores amarillentos. Consistencia muy blanda a firme. Clasifica, según el SUCS, como MH.

En el cuadro 4.13 se muestran las profundidades a las que se detectó la capa.

Cuadro 4.13. Intervalos profundidad de Capa 1

Sondeo	Profundidad (m)	
T-8a.1	0,00	2,50
T-8a.2	-	-
T-40.1	0,00	0,50
T-40.2	0,00	0,50
T-40.3	0,00	4,00
T-56.1	0,00	3,50
T-56.2	-	-

Capa 2: Material turbidítico con predominio de horizontes de arenisca con fuerte influencia volcánica, muy estratificado. Se comporta mayormente como limo de alta plasticidad, en ocasiones con arena. Color amarillento rojizo con manchas de oxidación negruzcas, presencia de bandas. Consistencia variable de muy blanda a firme. Clasifica, según el SUCS, como MH.

En el cuadro 4.14 se muestran las profundidades a las que se detectó la capa.

Cuadro 4.14. Intervalos profundidad de Capa 2

Sondeo	Profundidad (m)	
T-8a.1	2,50	6,00
T-8a.2	0,00	3,00
T-40.1	0,50	2,50
T-40.2	0,50	5,00
T-40.3	4,00	10,00
T-56.1	3,50	12,50
T-56.2	0,00	7,50

Capa 3: Material turbidítico, estratificado, con menor grado de alteración. Se comporta mayormente como limo de baja plasticidad, en ocasiones con arena. Color predominante rojizo-café y café-amarillento, en zonas gris-verdosas. Se aprecian manchas de oxidación negruzcas y amarillentas. Consistencia variable de firme a dura. Clasifica, según el SUCS, como ML.

En el cuadro 4.15 se muestran las profundidades a las que se detectó la capa.

Cuadro 4.15. Intervalos profundidad de Capa 3

Sondeo	Profundidad (m)	
T-8a.1	6,00	8,00
T-8a.2	3,00	6,50
T-40.1	-	-
T-40.2	5,00	8,00
T-40.3	10,00	15,00
T-56.1	12,50	13,00
T-56.2	7,50	9,00

Capa 4: Material turbidítico con menor grado de alteración. En ocasiones se aprecia fuerte influencia volcánica y muy estratificada. Se comporta mayormente como limo de baja plasticidad, en ocasiones con arena. Color predominante amarillento a crema, con algunas vetas negruzcas y grises en profundidad. Consistencia variable de muy firme a dura. Clasifica, según el SUCS, como ML. Posee mejor comportamiento ingenieril que las capas anteriores.

En el cuadro 4.16 se muestran las profundidades a las que se detectó la capa.

Cuadro 4.16. Intervalos profundidad de Capa 4

Sondeo	Profundidad (m)	
T-8a.1	8,00	10,00
T-8a.2	6,50	7,50
T-40.1	2,50	3,00
T-40.2	8,50	9,00
T-40.3	15,00	16,00
T-56.1	-	-
T-56.2	-	-

Ensayos físicos

Los resultados de los ensayos correspondientes a la clasificación de suelos realizados a las muestras obtenidas con SPT se muestran en el Anexo 3. Estos resultados muestran que el suelo de la ruta No. 856 en su mayoría, presenta gran cantidad de finos con una clasificación MH y ML (limos de alta y baja plasticidad); además, el suelo carece de contenido de grava. En el cuadro 4.17 se muestran los resultados de estos ensayos correspondientes a la caracterización de las propiedades físicas del suelo.

Propiedades físicas

La caracterización geotécnica de las propiedades físicas de cada capa correspondiente a los taludes en estudio se muestra en el cuadro 4.17.

Cuadro 4.17. Resumen de la caracterización de las propiedades físicas de las capas de los taludes en estudio

Capa	SUCS	Grava (%)	Arena (%)	T-200 (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	Gs
1	MH	0,00	5,28	94,72	74,4	46,2	35,2	11,70	44,4	2,61
2	MH	0,00	17,47	91,10	53,6	36,6	17,0	12,00	47,5	2,60
3	ML	0,00	7,10	87,90	45,7	30,8	11,7	14,20	46,9	2,58
4	ML	0,00	25,16	80,74	43,2	30,6	12,6	15,50	38,7	2,67
5	-	-	-	-	-	-	-	20,00	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	22,00	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	25,00	-	-

4.1.2.6. Ensayo de corte directo

El cuadro 4.18 muestra los resultados de los ensayos de corte directo de cada capa estudiada, en condición consolidada drenada (CD).

Cuadro 4.18. Valores de c' y ϕ' de acuerdo con los ensayos de corte directo

Capa geotécnica	Talud T-8a		Talud T-40		Talud T-56	
	c' (kPa)	ϕ' (°)	c (kPa)	ϕ' (°)	c (kPa)	ϕ' (°)
1	30	20	34	19	27	17
2	30	19	31	22	27	18
3	31	28	-	-	-	-
4	-	-	32	32	-	-

En el cuadro 4.19 se muestran, para cada capa estudiada, los resultados de los ensayos de corte directo en condición no consolidada no drenada (UU).

Cuadro 4.19. Valores de c y ϕ de acuerdo con los ensayos de corte directo (UU)

Capa geotécnica	Talud T-8a	Talud T-40	Talud T-56
	c_u (kPa)	c_u (kPa)	c_u (kPa)
1	20	32	17
2	22	33	18
3	42	-	-
4	-	45	-

Una vez realizado el estudio geotécnico detallado, que consistió en complementar el levantamiento geológico y las descripciones rápidas de los taludes con las clasificaciones geomecánicas, la refracción sísmica, las perforaciones y ensayos de laboratorio, se está en condiciones de interpretar de forma conjunta los resultados y definir las variables para las diferentes hipótesis de cálculo de la estabilidad de los taludes y el análisis técnico de las propuestas de soluciones.

4.1.3. Etapa de modelado y diseño

4.1.3.1. Generación del modelo geotécnico

Los resultados de los levantamientos topográficos de cada uno de los tres taludes en estudio, como las curvas de nivel, la sección transversal, una vista del isométrico y los detalles de las perforaciones realizadas, con

las cuales se define el perfil geotécnico, se muestran en las figuras 4.18, 4.19 y 4.20. En los perfiles geotécnicos se muestra la condición de ladera natural, corte del talud y la correspondiente falla.

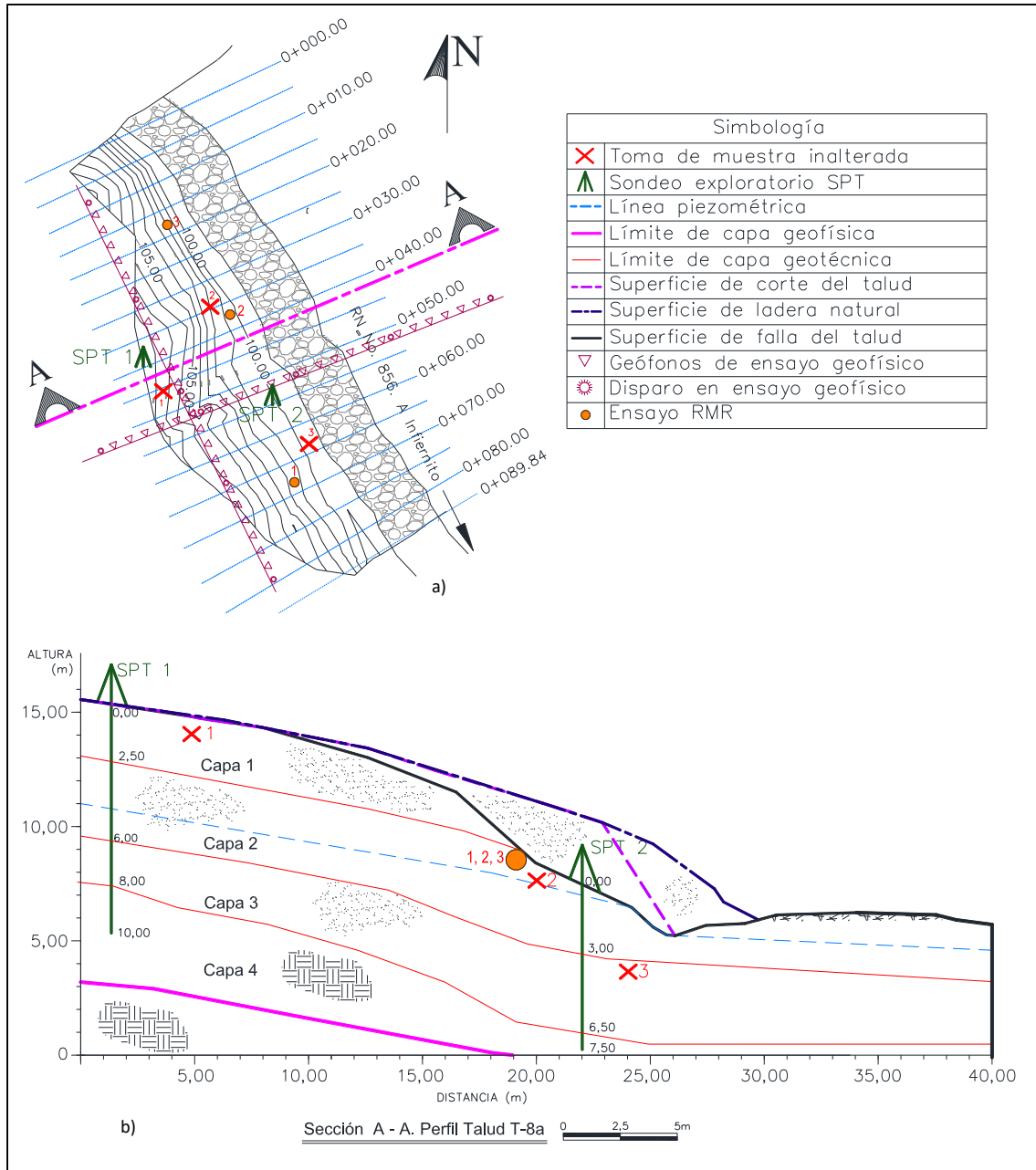


Figura 4.18. Perfil geotécnico del talud T-8a a) Levantamiento topográfico en planta, b) Perfil geotécnico

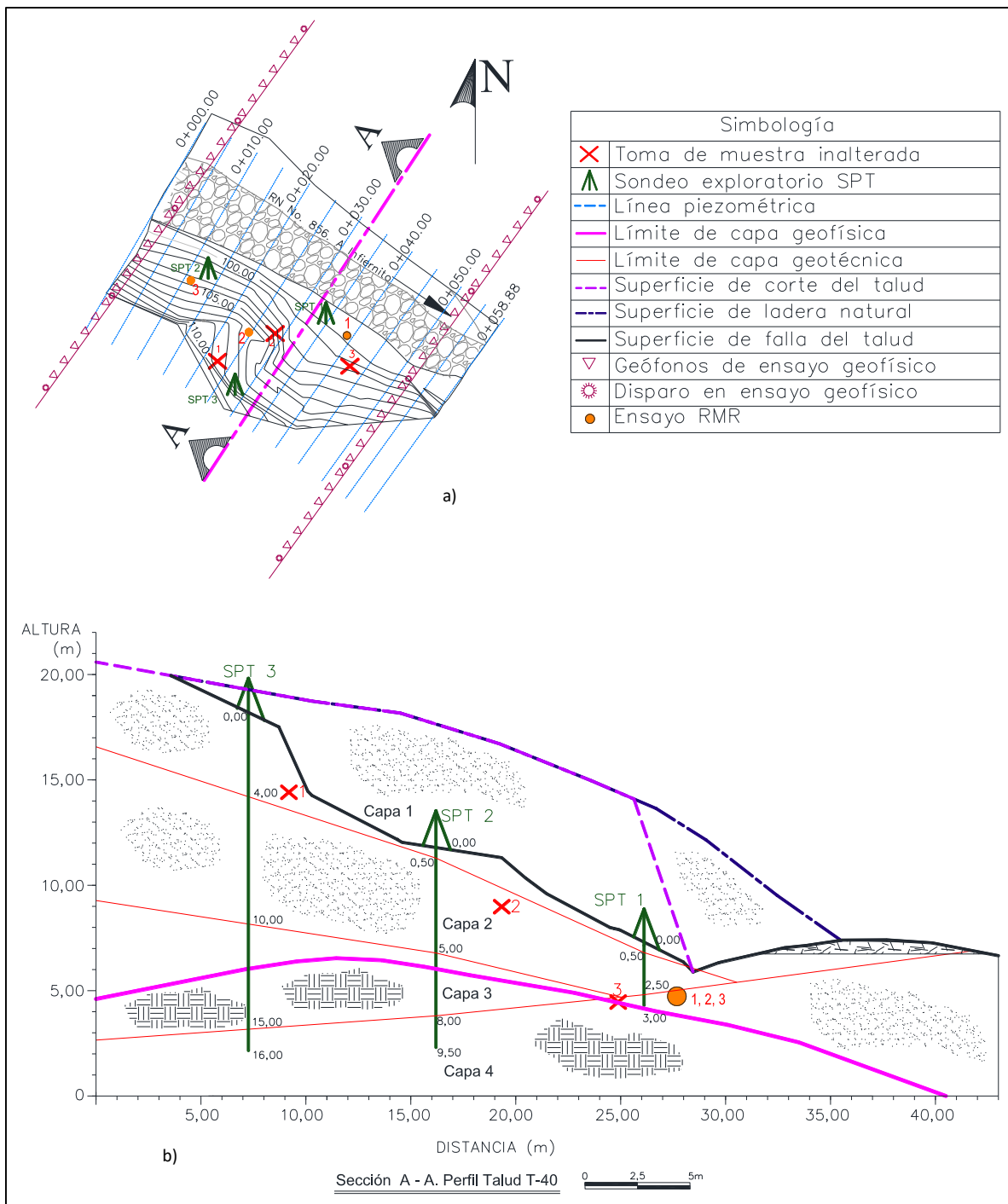


Figura 4.19. Perfil geotécnico del talud T-40 a) Levantamiento topográfico en planta, b) Perfil geotécnico

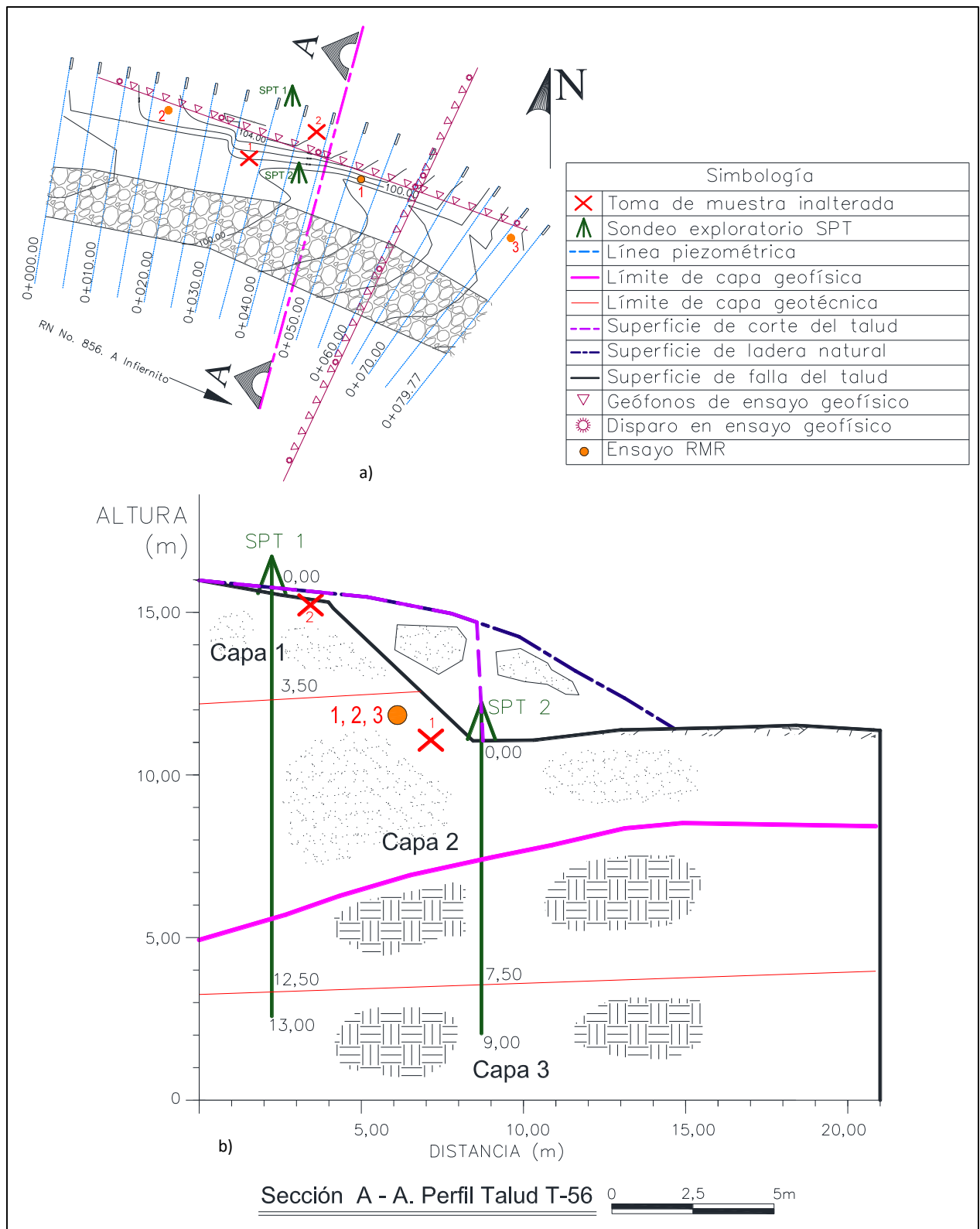


Figura 4.20. Perfil geotécnico del talud T-56 a) Levantamiento topográfico en planta b) Perfil geotécnico

A modo de ilustración, en la figura 4.21 se muestran algunas fotografías en las cuales se puede apreciar la condición antes y después de cada uno de los taludes en estudio. En el lado izquierdo se realizaron trabajos inadecuados a los taludes cambiando las condiciones de falla sin haber realizado análisis previos; por ejemplo, en el talud T-8a se aplica una limpieza desde el pie del talud para colocarle fibra de coco, en el talud T-40 se coloca fibra de coco sobre la superficie de corte, y en el talud T-56 se realiza un corte semivertical. En el lado derecho se observa la falla de cada uno de los taludes en estudio producto de los trabajos realizados inadecuadamente.

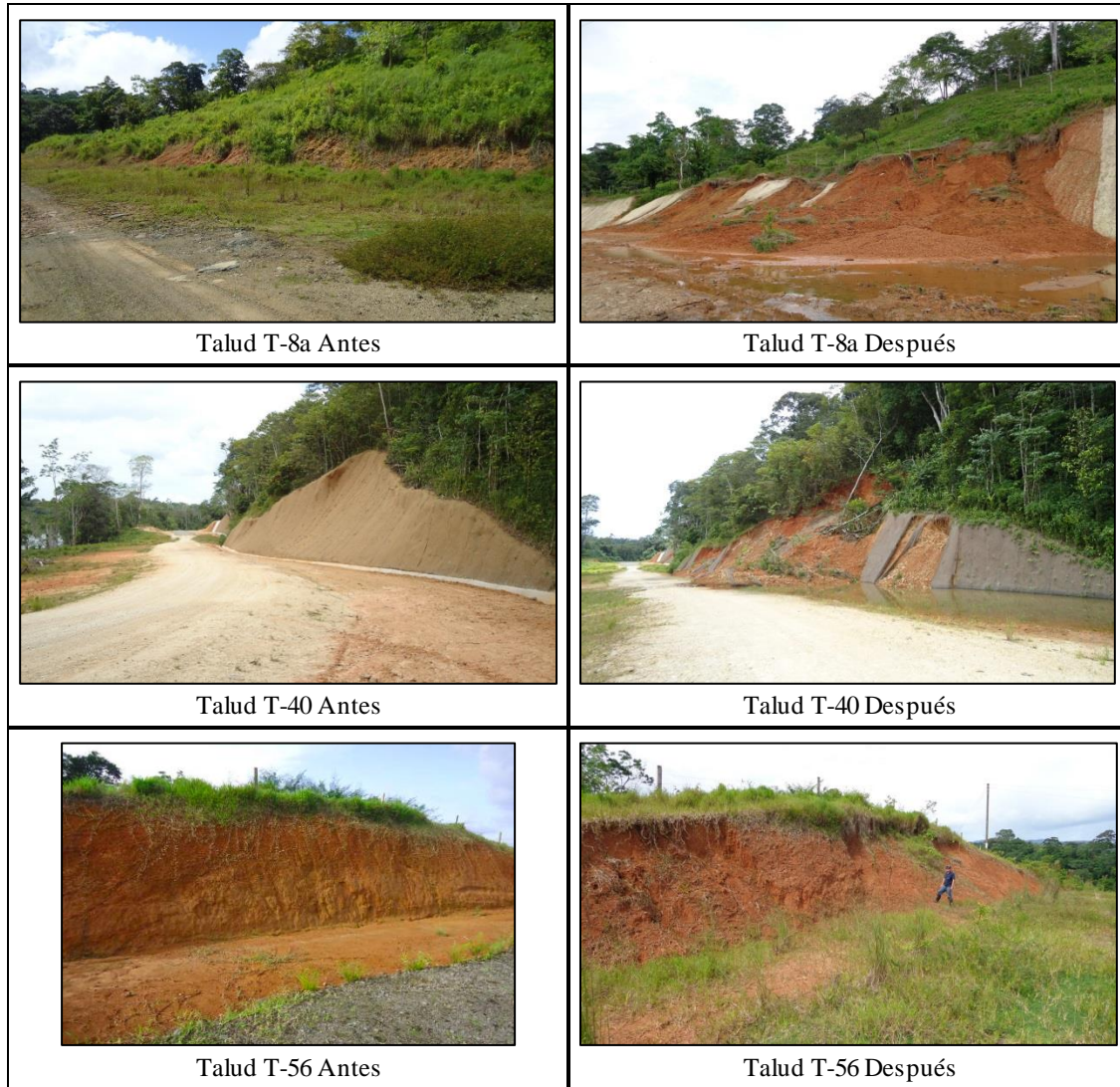


Figura 4.21. Situación antes y después de los taludes en estudio

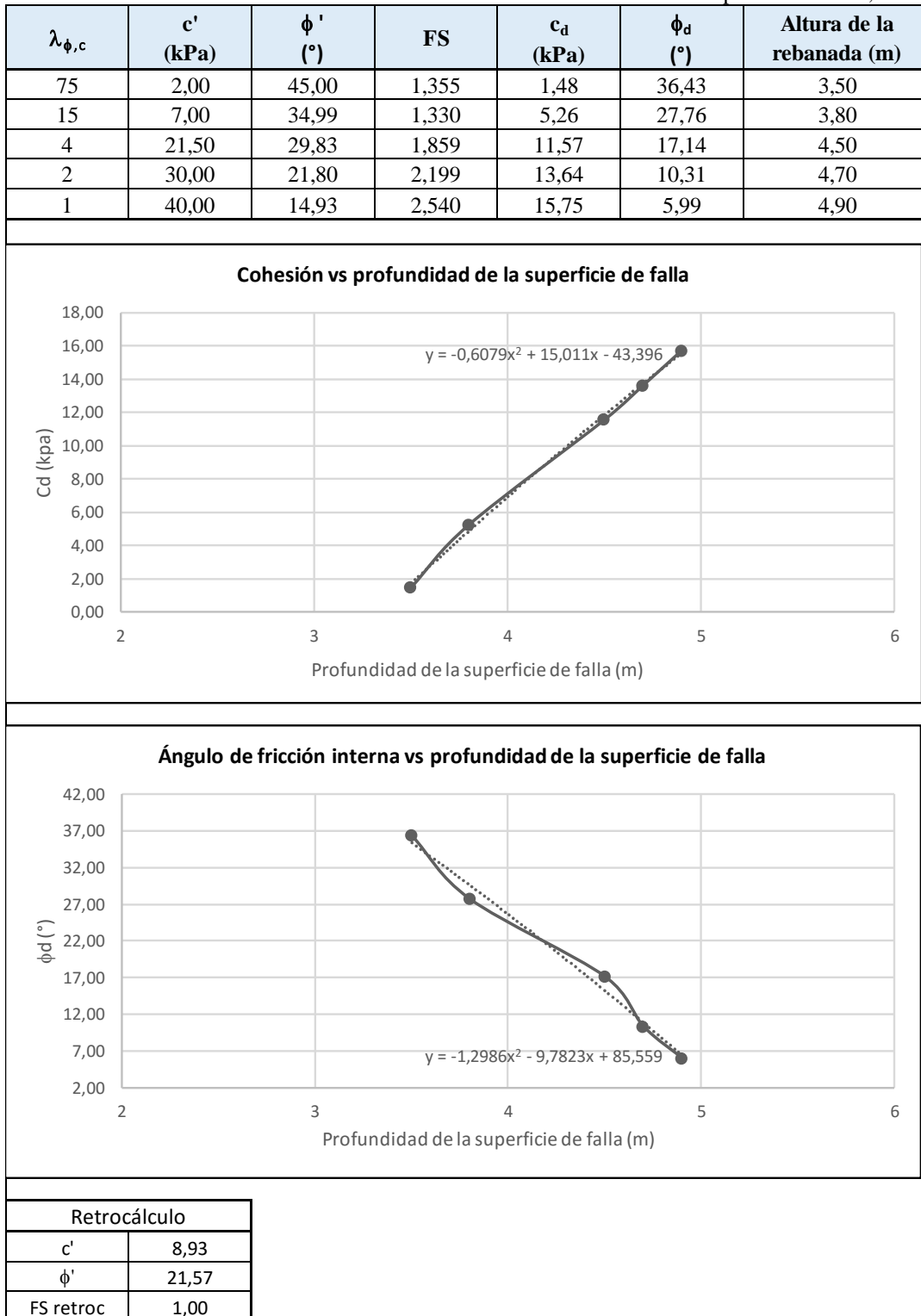
4.1.3.2. Proceso de modelado y calibración del modelo geotécnico

Una vez realizada la caracterización de las propiedades físicas y mecánicas del suelo de los tres taludes en estudio, se procede al análisis de estabilidad.

En los cuadros siguientes 4.20, 4.21 y 4.22 se muestran los procesos de retrocálculo por medio del método de la geometría de la superficie de falla (Duncan et al., 2014), con el cual se obtuvieron los valores de los parámetros de resistencia c y ϕ necesarios para desarrollar el modelo a calibrar. Con este modelo se puede

determinar la condición del talud en el momento de la falla y, de esta manera, utilizarlo como base para el análisis de las soluciones de estabilidad.

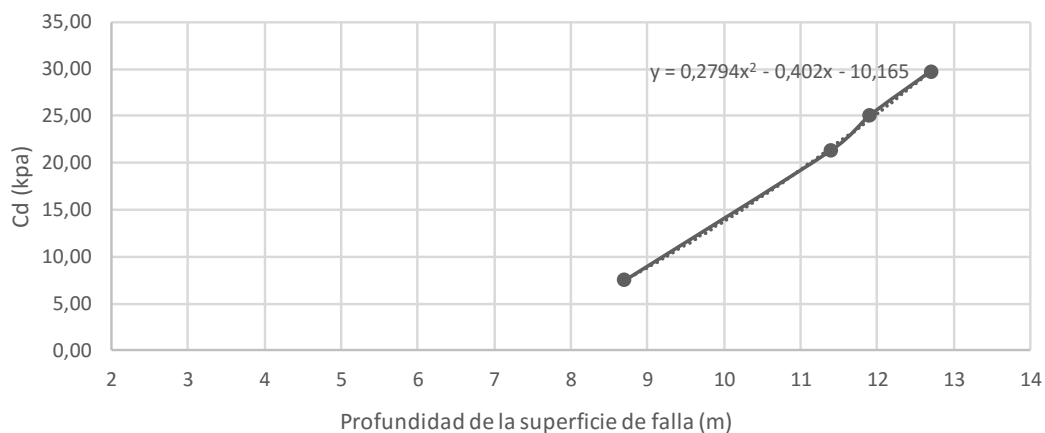
Cuadro 4.20. Parámetros de resistencia al cortante recalculados basados en la superficie de falla, talud T-8a



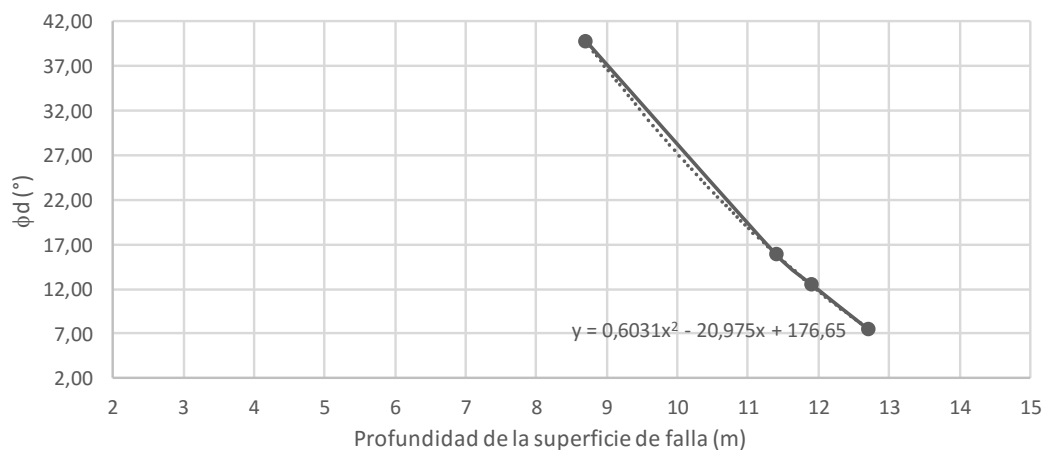
Cuadro 4.21. Parámetros de resistencia al cortante recalculados basados en la superficie de falla, talud T-40

$\lambda_{\phi, c}$	c' (kPa)	ϕ' (°)	FS	c_d (kPa)	ϕ_d (°)	Altura de la rebanada (m)
25	7,00	37,87	0,933	7,50	39,82	8,70
3	30,00	21,80	1,408	21,31	15,86	11,40
2	40,00	19,57	1,601	24,98	12,52	11,90
1	50,00	12,53	1,684	29,69	7,52	12,70

Cohesión vs profundidad de la superficie de falla



Ángulo de fricción interna vs profundidad de la superficie de falla

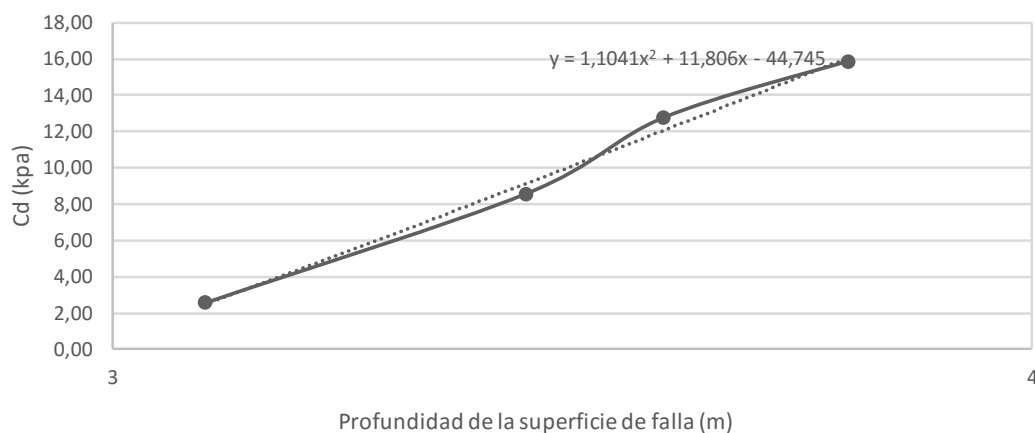


Retrocálculo	
c'	14,80
ϕ'	25,45
FS retroc	1,00

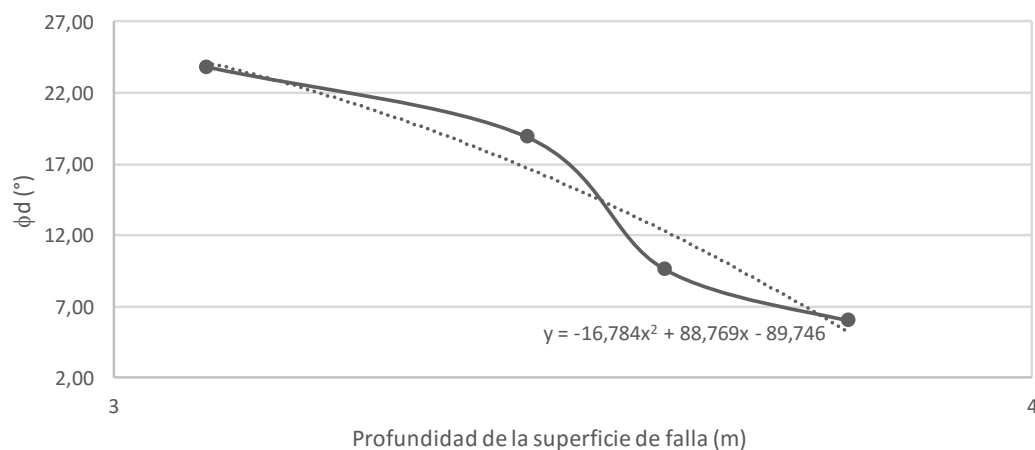
Cuadro 4.22. Parámetros de resistencia al cortante retrocalculados basados en la superficie de falla, talud T-56

$\lambda_{\phi,c}$	c' (kPa)	ϕ' (°)	FS	c_d (kPa)	ϕ_d (°)	Altura de la rebanada (m)
13	5,00	40,91	1,963	2,55	23,82	3,10
3	20	38,66	2,336	8,56	18,90	3,45
1	30	21,80	2,352	12,76	9,65	3,60
0,5	40	14,93	2,524	15,85	6,03	3,80

Cohesión vs profundidad de la superficie de falla



Ángulo de fricción interna vs profundidad de la superficie de falla



Retrocálculo	
c'	7,20
ϕ'	19,27
FS retroc	1,00

Los intervalos de los resultados de cada uno de los ensayos que se tomaron en cuenta para modelar los taludes se muestran en el cuadro 4.23. Este cuadro muestra, además, los resultados de los parámetros Mohr-Coulomb provenientes del modelado con el programa, con los cuales se obtuvo la condición de convergencia mediante el proceso de calibración para la condición estática haciendo uso del programa SLOPE/W®. Estos valores son de gran importancia para su utilización en las propuestas de solución.

Cuadro 4.23. Intervalos de valores para el proceso de calibración y valores de convergencia en cada talud

Capa	Método	Intervalo de valores aproximados para calibración del modelo y valores de convergencia resultantes por capa por talud		
		γ_h (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
1	Geofísica	17,00	22 - 28	20 - 24
	Propiedades físicas	16,80	-	-
	Corte directo	-	27 - 34	17 - 20
	RMR	-	-	-
	Valor de convergencia Talud T-8a	16,00	14	19
	Valor de convergencia Talud T-40	16,00	18	17
	Valor de convergencia Talud T-56	17,00	12	14
2	Geofísica	17,00	22 - 28	20 - 24
	Propiedades físicas	17,70	-	-
	Corte directo	-	27 - 31	18 - 22
	RMR	18,00 - 19,00	22 - 24	29 - 31
	Valores de convergencia Talud T-8a	18,00	9	22
	Valores de convergencia Talud T-40	18,00	13	24
	Valores de convergencia Talud T-56	19,00	7	19
3	Geofísica	20,00	22 - 28	24 - 29
	Propiedades físicas	20,86	-	-
	Corte directo	-	31	28
	RMR	-	-	-
	Valor promedio Talud T-8a	20,40	25	27
	Valor promedio Talud T-40	20,40	28	28
	Valor promedio Talud T-56	20,40	26	27
4	Geofísica	22,00	30 - 36	28 - 35
	Propiedades físicas	21,50	-	-
	Corte directo	-	32	32
	RMR	21,00	37	38
	Valor promedio Talud T-8a	21,50	34	31
	Valor promedio Talud T-40	21,50	34	31

El cuadro 4.24 muestra los resultados del proceso de calibración en condición de frente húmedo haciendo uso de los parámetros no consolidados no drenados provenientes del ensayo de corte directo mostrados en el cuadro 4.19.

Cuadro 4.24. Parámetros de resistencia calibrados en condición de frente húmedo

Capa Geotécnica	T-8a		T-40		T-56	
	γ_h (kN/m ³)	c_u (kPa)	γ_h (kN/m ³)	c_u (kPa)	γ_h (kN/m ³)	c_u (kPa)
1	16,00	16	16,00	29	17,00	15
2	18,00	18	18,00	30	19,00	16

Se muestran los análisis de cada uno de los taludes en su condición de convergencia con las condiciones de falla actuales en las figuras de la 4.22 a la 4.27. Para el caso de los taludes en estudio, dado que son materiales heterogéneos que se comportan como suelos, dentro del concepto global de suelo se considera como mejor ajuste o aproximación la falla circular.

En virtud de la experiencia que se ha tenido en la zona de estudio a lo largo de cinco años, la condición de análisis que se considera representativa de las fallas causadas es la condición estática con nivel freático en términos de esfuerzos efectivos; sin embargo, en vista de que en la zona son frecuentes las fuertes e intensas lluvias, se muestran también los resultados de calibración para la condición de falla del talud con frente húmedo tomando en cuenta los fenómenos ambientales que tuvieron lugar a lo largo de los cinco años.

En cuanto a la sismología, de acuerdo con el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI), en Costa Rica han ocurrido aproximadamente 733 sismos perceptibles entre los años 2011 y 2016, de los cuales 14 fueron reportados en la región donde se ubican los taludes en estudio. De los 14 sismos, se destacan 5 ocurridos entre los años 2012 y 2015, fechas en las cuales se realizaron visitas de inspección con el fin de evidenciar efectos causados por los sismos; sin embargo, se observó que no se presentaron daños asociados, por lo que la condición prevaleciente de falla en los taludes en estudio no es la de sismo. El detalle de los sismos mencionados más importantes aparecen en el Apéndice 6.

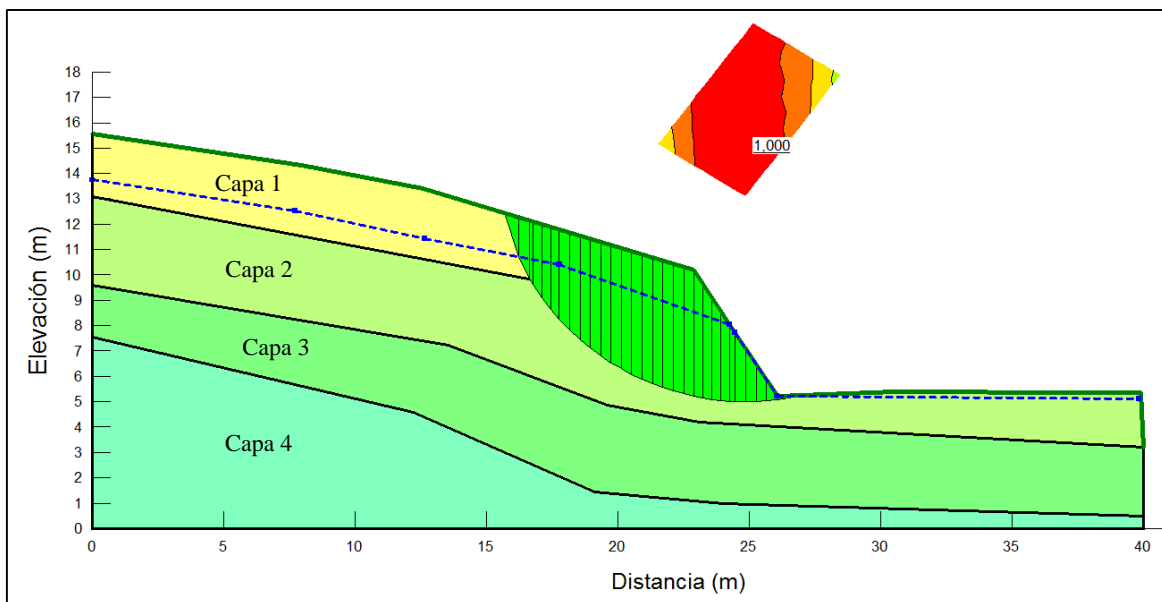


Figura 4.22. Calibración del modelo en condición estática con nivel freático para el Talud T-8a

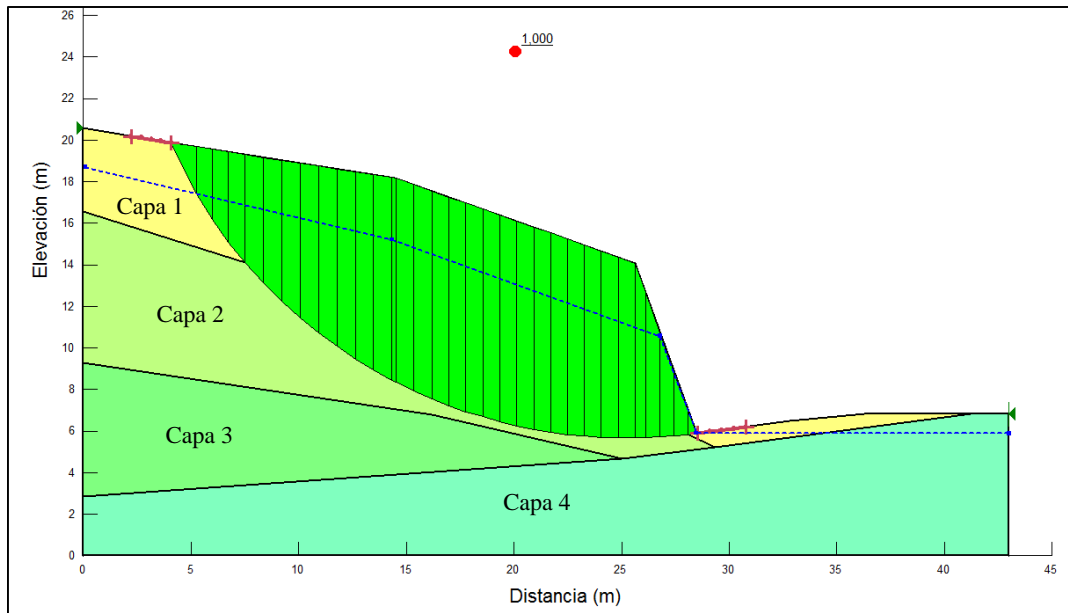


Figura 4.23. Calibración del modelo en condición estática con nivel freático para el Talud T-40

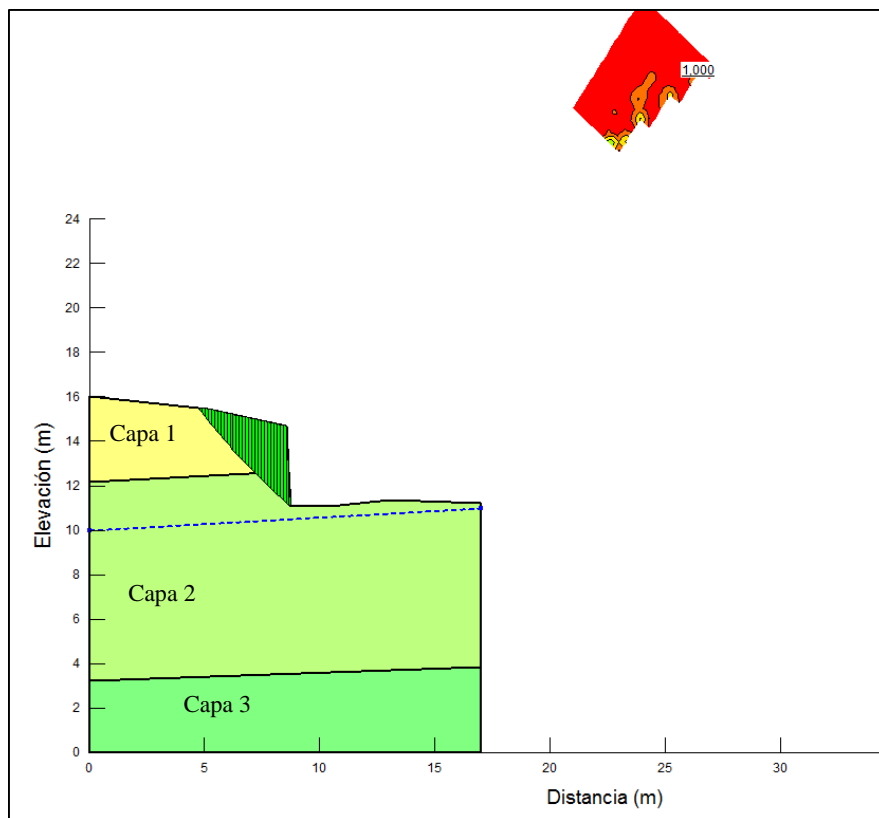


Figura 4.24. Calibración del modelo en condición estática con nivel freático para el Talud T-56

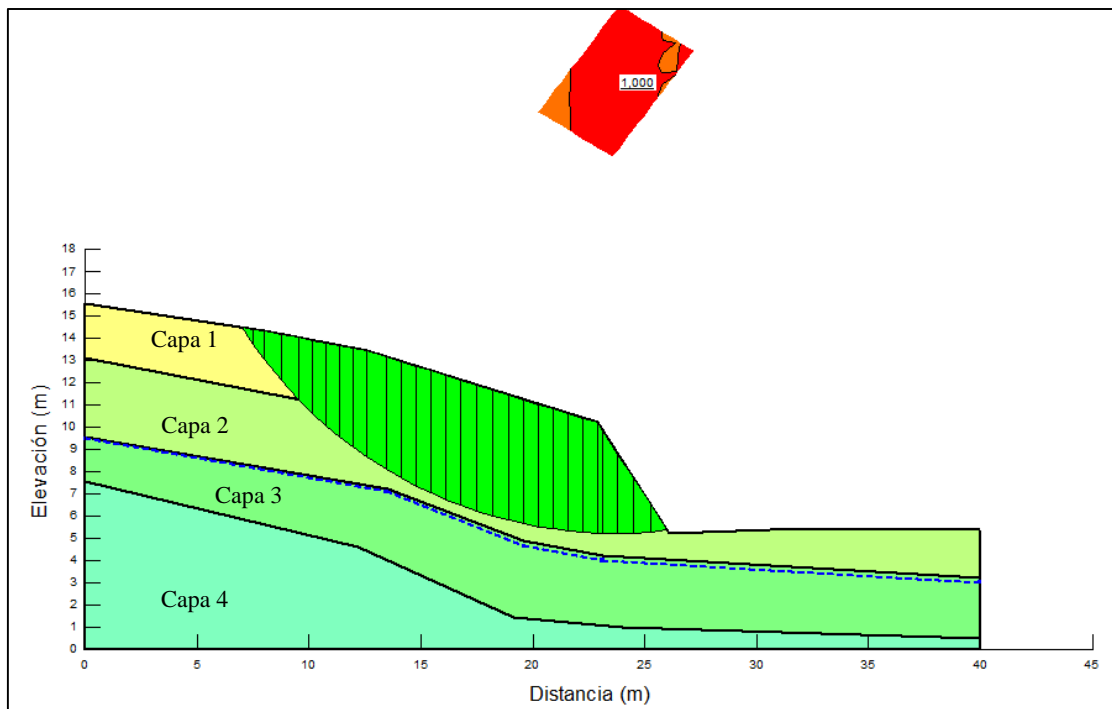


Figura 4.25. Calibración del modelo en condición de frente húmedo para el Talud T-8a

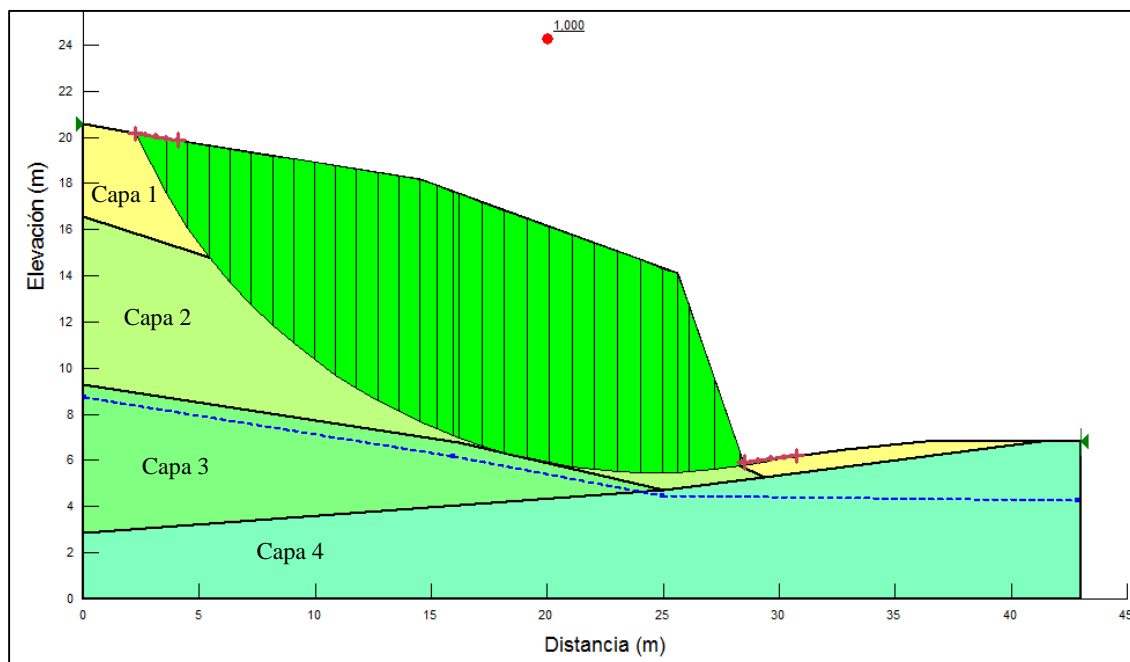


Figura 4.26. Calibración del modelo en condición de frente húmedo para el Talud T-40

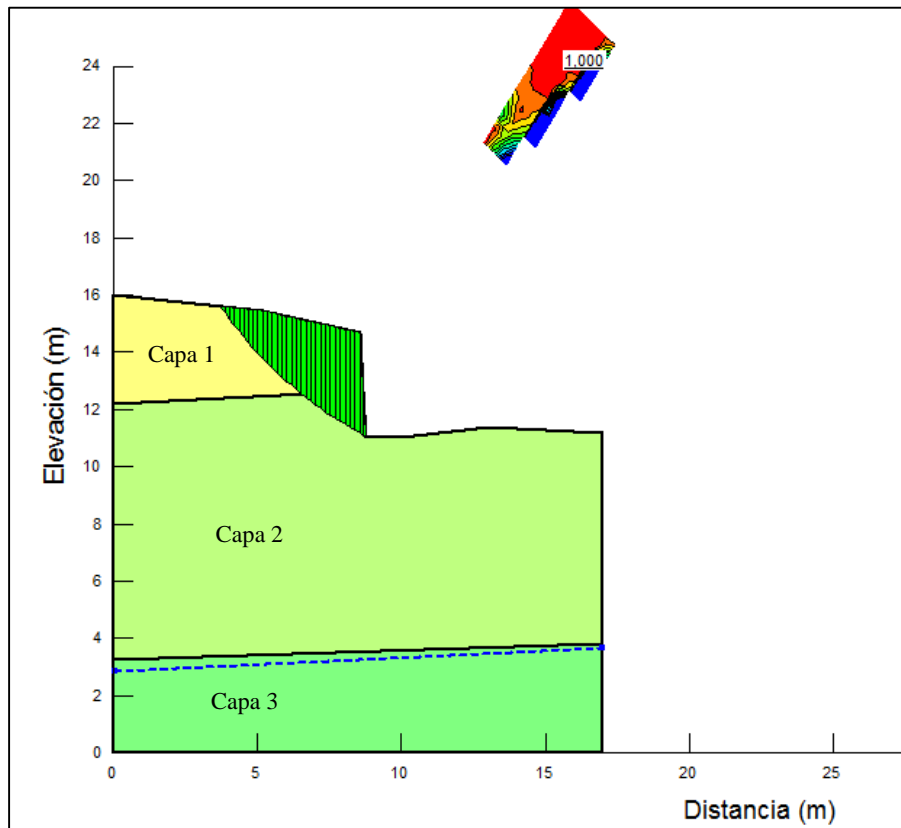


Figura 4.27. Calibración del modelo en condición de frente húmedo para el Talud T-56

Se modelaron, además, los taludes en su condición de ladera natural y los taludes de corte. Los taludes en ladera natural fueron analizados en las seis condiciones de falla, mientras que los taludes de corte y las correspondientes soluciones de estabilidad se analizaron en las cuatro condiciones de falla mencionadas en la metodología de este estudio.

Se realizó una revisión adicional con el fin de probar diversos escenarios y observar los resultados. Para ello, los cuadros del 4.25 al 4.30 muestran los factores de seguridad resultantes para cada una de las laderas y taludes de corte utilizando los valores producto de la calibración del cuadro 4.23, del cuadro 4.24 y los resultados del ensayo del cuadro 4.19.

Se puede observar que el análisis pseudoestático con frente húmedo en condición no consolidada no drenada efectuada únicamente en las laderas no corresponde con lo que sucede en la realidad, debido a que los resultados muestran que las laderas estaban en condición inestable ante sismos y fuertes e intensas lluvias formándose así un frente húmedo simultáneamente, cuando lo recomendable es realizar el análisis en condición pseudoestática no consolidada no drenada (Duncan et al., 2014).

Obsérvese que las tres laderas se encontraban en condición estable en condiciones drenadas y los tres cortes se encontraban generalmente en condición inestable.

Los ficheros de los resultados del factor de seguridad calculados con el SLOPE/W® se encuentran en el Apéndice 5.

Cuadro 4.25. Factores de seguridad para la ladera del sitio del talud T-8a

Condiciones de análisis	FS Obtenido	FS recomendado	Condición
Estática con NF, c' , ϕ'	1,46	1,40	Estable
Estática sin NF, c' , ϕ'	2,00	1,40	Estable
Pseudoestática sin NF, c' , ϕ'	1,69	1,05	Estable
Estática con NF, frente húmedo, c' , ϕ'	1,16	1,40	Inestable
Pseudoestática con frente húmedo, cond. UU	0,81	1,05	Inestable
Pseudoestática condición UU	1,02	1,05	Inestable

Cuadro 4.26. Factores de seguridad para la ladera del sitio del talud T-40

Condiciones críticas	FS Obtenido	FS recomendado	Condición
Estática con NF, c' , ϕ'	1,46	1,40	Estable
Estática sin NF, c' , ϕ'	2,23	1,40	Estable
Pseudoestática sin NF, c' , ϕ'	1,67	1,05	Estable
Estática con NF, frente húmedo, c' , ϕ'	1,40	1,40	Estable
Pseudoestática con frente húmedo, cond. UU	0,85	1,05	Inestable
Pseudoestática condición UU	1,03	1,05	Inestable

Cuadro 4.27. Factores de seguridad para la ladera del sitio del talud T-56

Condiciones críticas	FS Obtenido	FS recomendado	Condición
Estática con NF, c' , ϕ'	2,00	1,40	Estable
Estática sin NF, c' , ϕ'	2,01	1,40	Estable
Pseudoestática sin NF, c' , ϕ'	1,44	1,05	Estable
Estática con NF, frente húmedo, c' , ϕ'	1,54	1,40	Estable
Pseudoestática con frente húmedo, cond. UU	1,01	1,05	Inestable
Pseudoestática condición UU	0,97	1,05	Inestable

Cuadro 4.28. Factores de seguridad para el corte en el talud T-8a

Condiciones de análisis	FS Obtenido	FS recomendado	Condición
Estática con NF, c' , ϕ'	1,00	1,40	Inestable
Estática sin NF, c' , ϕ'	1,33	1,40	Inestable
Estática con NF, frente húmedo, c' , ϕ'	1,00	1,40	Inestable
Pseudoestática condición UU	0,87	1,05	Inestable

Cuadro 4.29. Factores de seguridad para el corte en el talud T-40

Condiciones críticas	FS Obtenido	FS recomendado	Condición
Estática con NF, c' , ϕ'	1,00	1,40	Inestable
Estática sin NF, c' , ϕ'	1,62	1,40	Estable
Estática con NF, frente húmedo, c' , ϕ'	1,00	1,40	Inestable
Pseudoestática condición UU	0,75	1,05	Inestable

Cuadro 4.30. Factores de seguridad para el corte en el talud T-56

Condiciones críticas	FS Obtenido	FS recomendado	Condición
Estática con NF, c' , ϕ'	1,00	1,40	Inestable
Estática sin NF, c' , ϕ'	1,01	1,40	Inestable
Estática con NF, frente húmedo, c' , ϕ'	1,00	1,40	Inestable
Pseudoestática condición UU	0,97	1,05	Inestable

4.1.3.3. Propuesta de solución del caso

Basado en los valores obtenidos en los procesos de calibración efectuados y una vez que se cuenta con la convergencia deseada, se realiza el modelado de las propuestas de solución. La solución comprende eliminar parte del material y realizar bermas con pendientes suaves; lo más adecuado en estos taludes son las soluciones geométricas debido a que, al tratarse del corredor fronterizo, se cuenta con el espacio suficiente para realizar los trabajos, dejando claro que las soluciones de drenaje y protección contra la erosión son necesarias. Se deben construir contracunetas de guarda en la parte superior de los taludes, así como un canal en el contratalud de las bermas. Estas bermas aumentan considerablemente la estabilidad.

Se tipifican a continuación las propuestas definitivas de solución a la inestabilidad de los tres taludes en estudio.

Talud T-8a

Se probaron diversas configuraciones geométricas y la que se consideró más eficiente fue la configuración de bermas de 3 m de ancho con pendiente de 1,5:1 y alturas entre bermas de 7 m. En el cuadro 4.31 se muestran los resultados de los factores de seguridad para las cuatro condiciones de análisis de la solución geométrica propuesta y estable que cumplen con los valores mínimos exigidos. En las figuras de la 4.28 a la 4.31 se muestran estas mismas soluciones modeladas en el programa y en la figura 4.32 se presenta el perfil geotécnico del talud con los detalles de la solución propuesta.

Cuadro 4.31. Factores de seguridad de la solución propuesta talud T-8a

Condición	FS solución	FS recomendado	Condición del talud
Estática con NF, c' , ϕ'	1,46	1,40	Estable
Estática sin NF, c' , ϕ'	1,66	1,40	Estable
Estática con NF, frente húmedo, c' , ϕ'	1,47	1,40	Estable
Pseudoestática condición UU	1,17	1,05	Estable

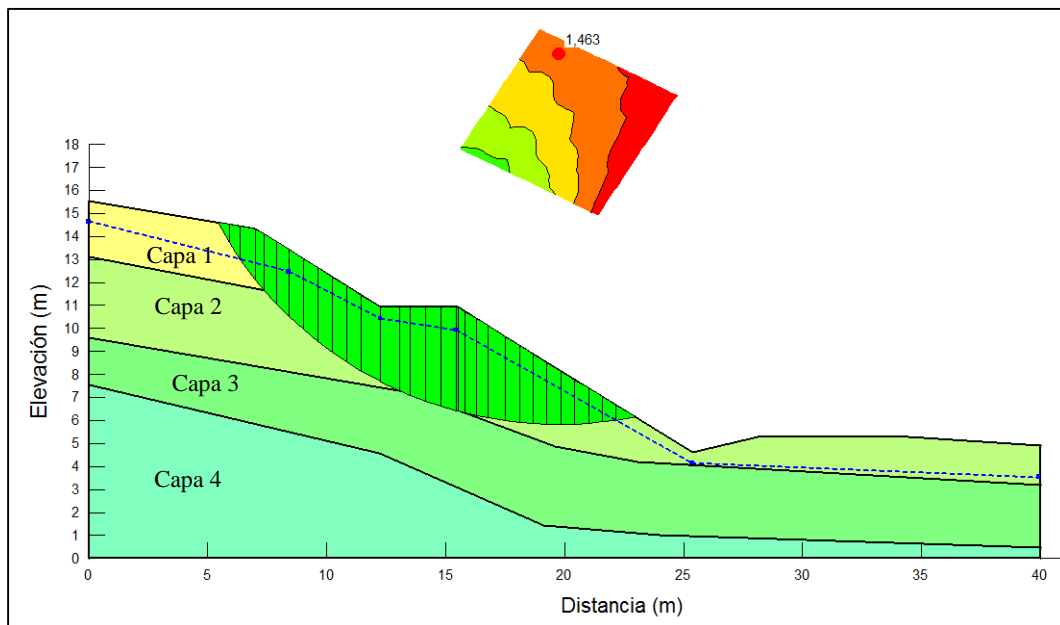


Figura 4.28. Estabilidad del Talud T-8a condición estática con NF

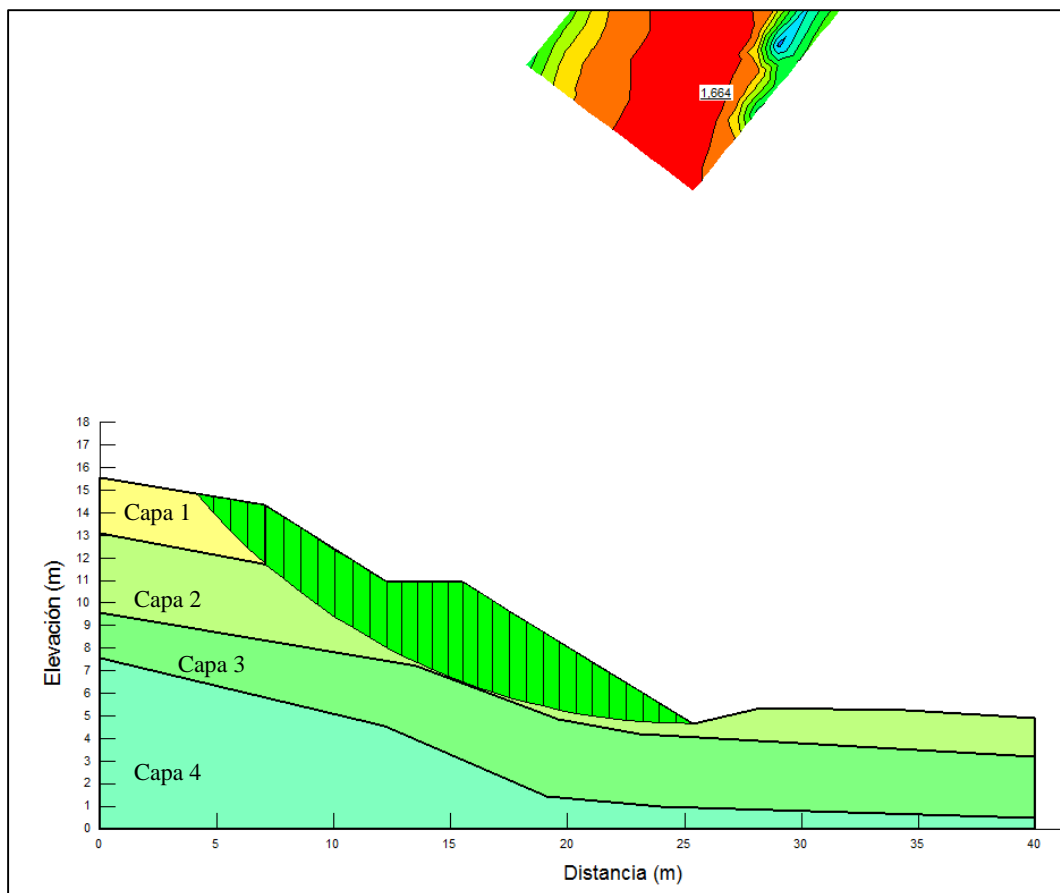


Figura 4.29. Estabilidad del Talud T-8a condición estática sin NF

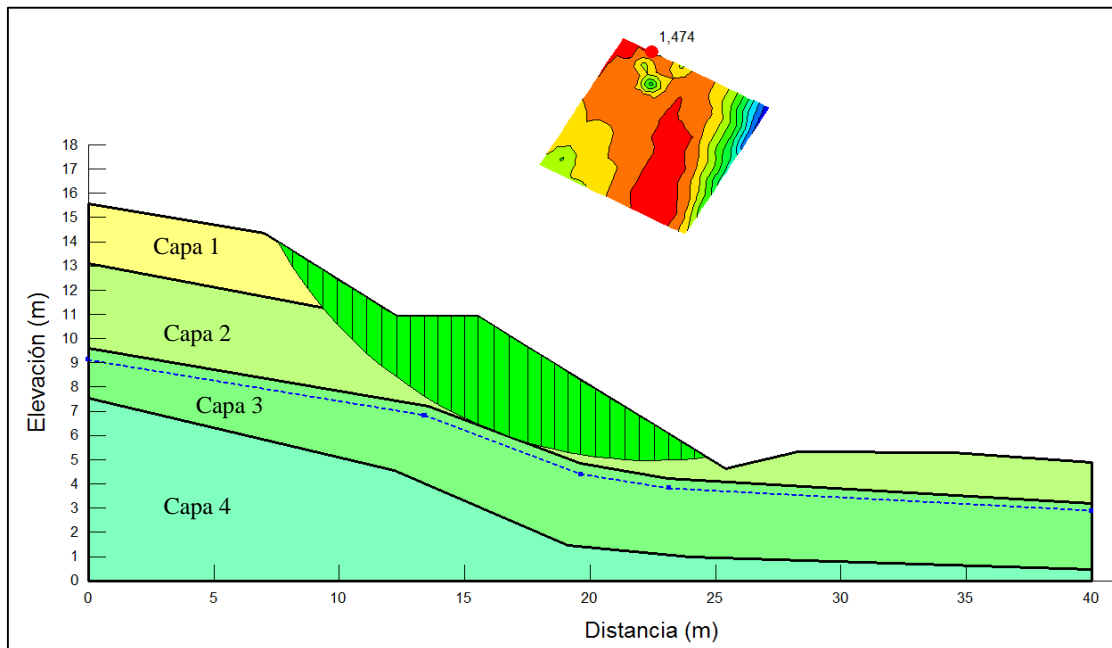


Figura 4.30. Estabilidad del talud T-8a condición frente húmedo

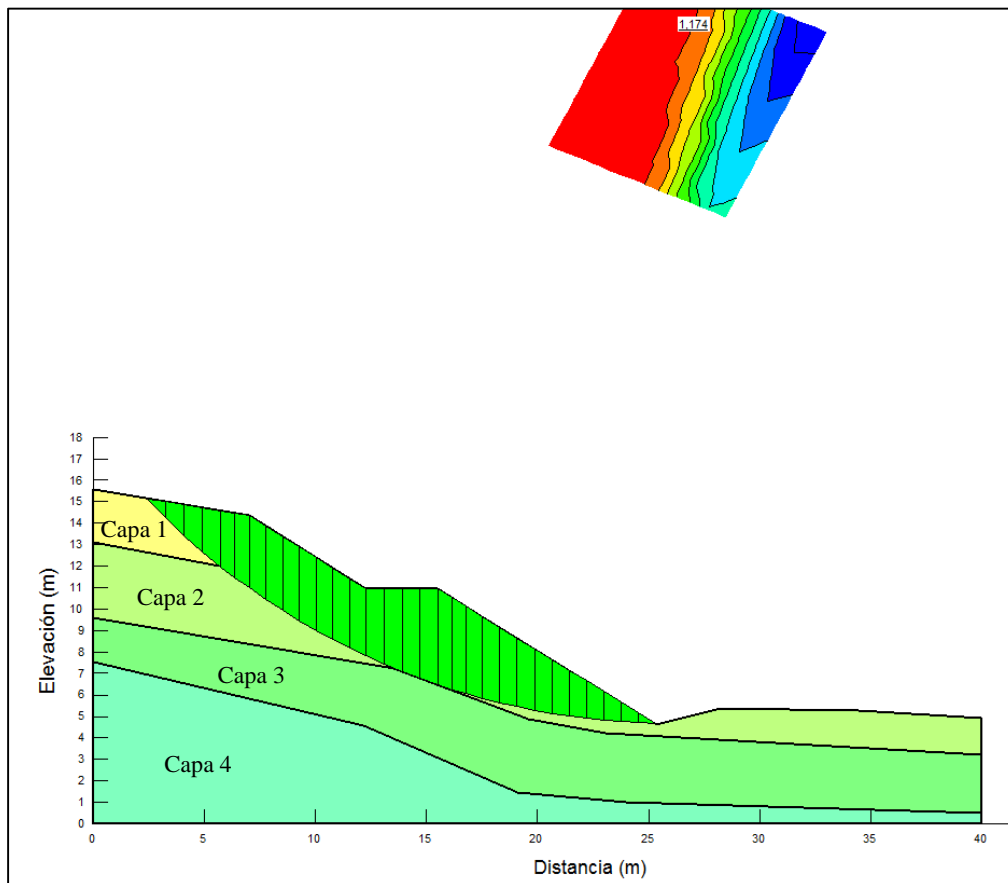


Figura 4.31. Estabilidad del Talud T-8a condición pseudoestática

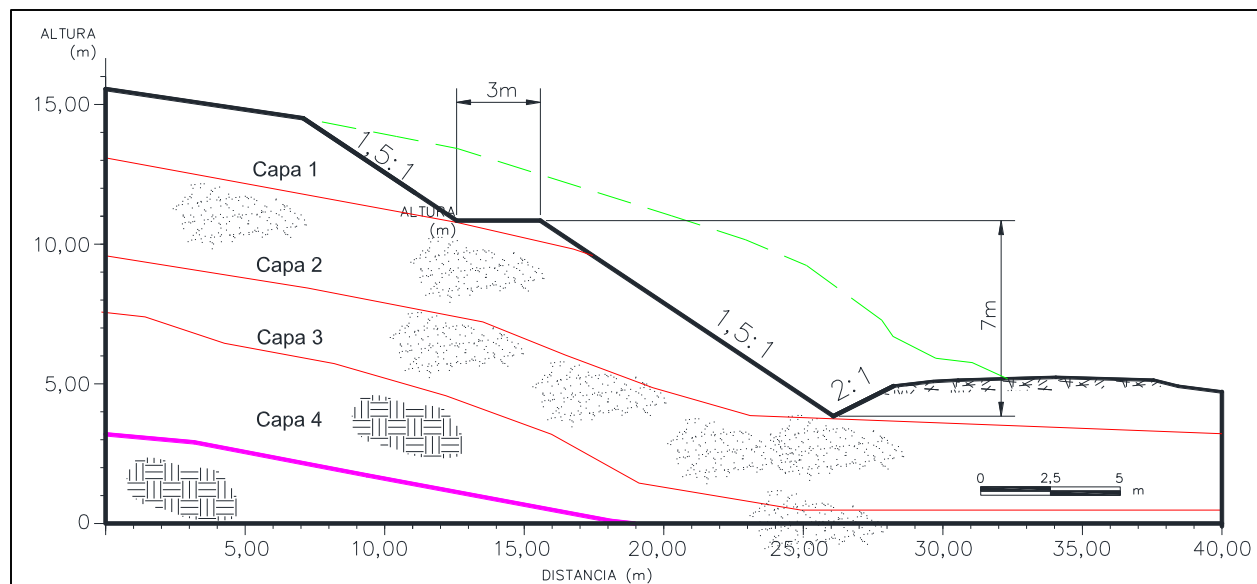


Figura 4.32. Perfil geotécnico de propuesta de solución para el talud T-8a

Talud T-40

De igual manera, se probaron diversas configuraciones geométricas y la que se consideró más eficiente fue la configuración de bermas de 3 m de ancho con pendiente de 1,5:1 y, en este caso, la altura entre bermas que arrojó mejores resultados fue la de 8 m. En el cuadro 4.32 se muestran los resultados de los factores de seguridad para las cuatro condiciones de análisis de la solución geométrica propuesta y estable que cumplen con los valores mínimos exigidos. En las figuras de la 4.33 a la 4.36 se muestran estas mismas soluciones modeladas en el programa y en la figura 4.37 se presenta el perfil geotécnico del talud con los detalles de la solución propuesta.

Cuadro 4.32. Factores de seguridad de la solución propuesta talud T-40

Condición	FS solución	FS recomendado	Condición del talud
Estática con NF, c' , ϕ'	1,45	1,40	Estable
Estática sin NF, c' , ϕ'	1,69	1,40	Estable
Estática con NF, frente húmedo, c' , ϕ'	1,55	1,40	Estable
Pseudoestática condición UU	1,44	1,05	Estable

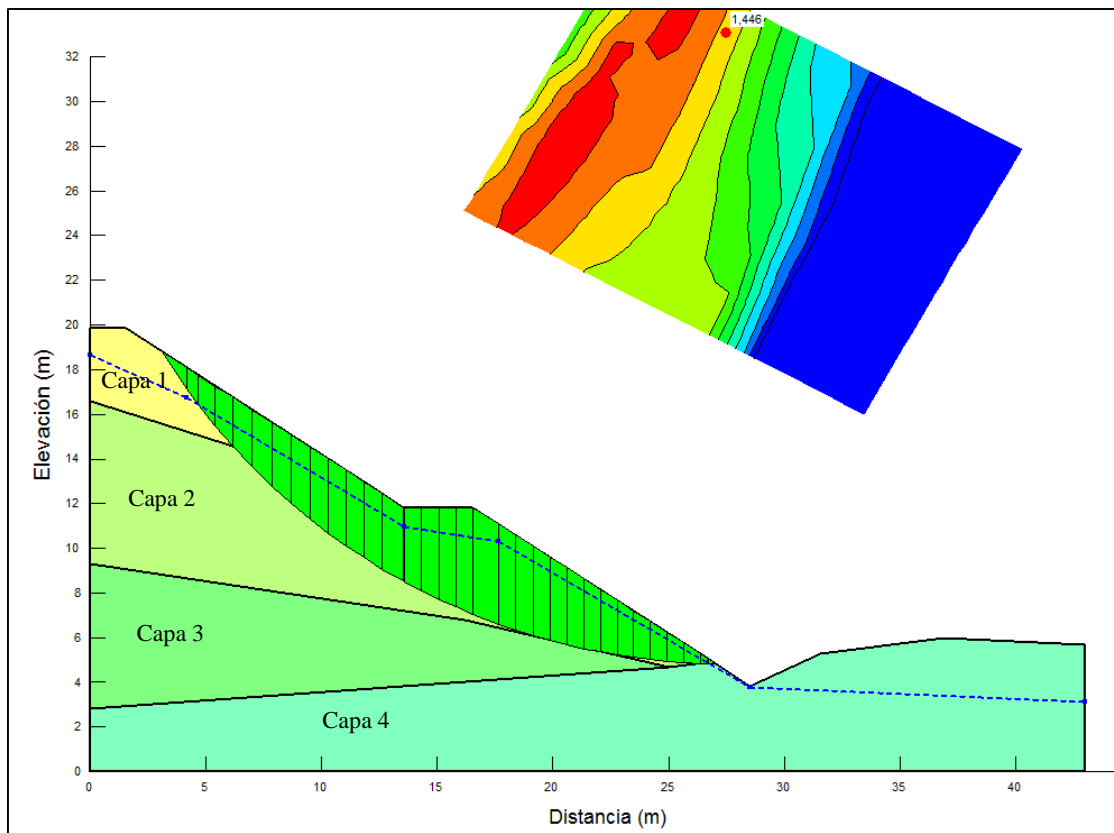


Figura 4.33. Estabilidad del Talud T-40 condición estática con NF

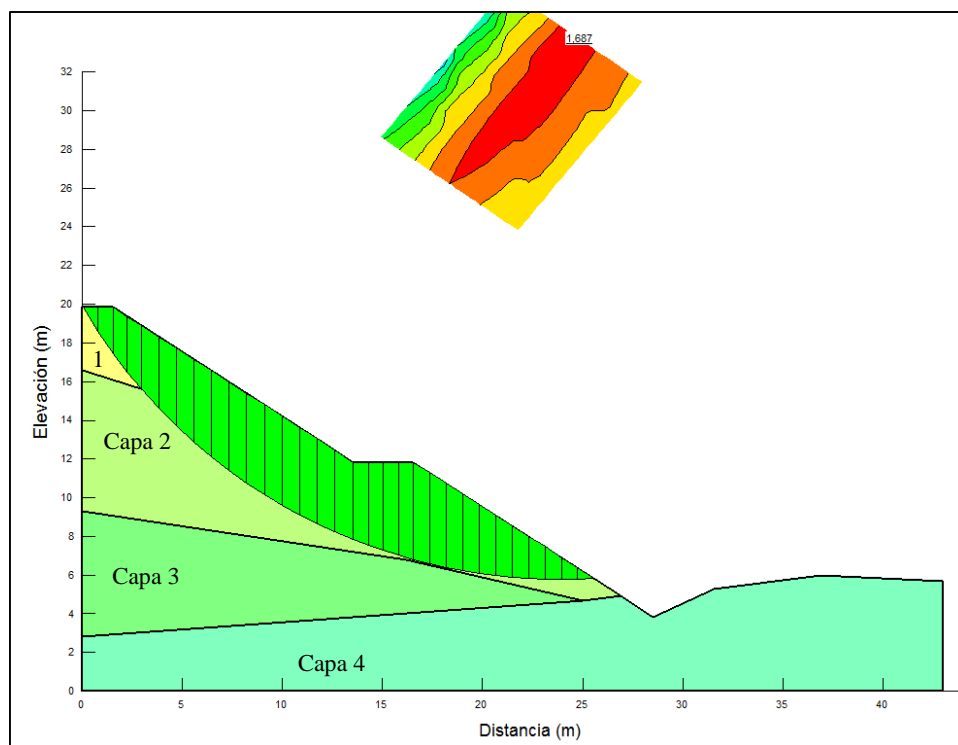


Figura 4.34. Estabilidad del Talud T-40 condición estática sin NF

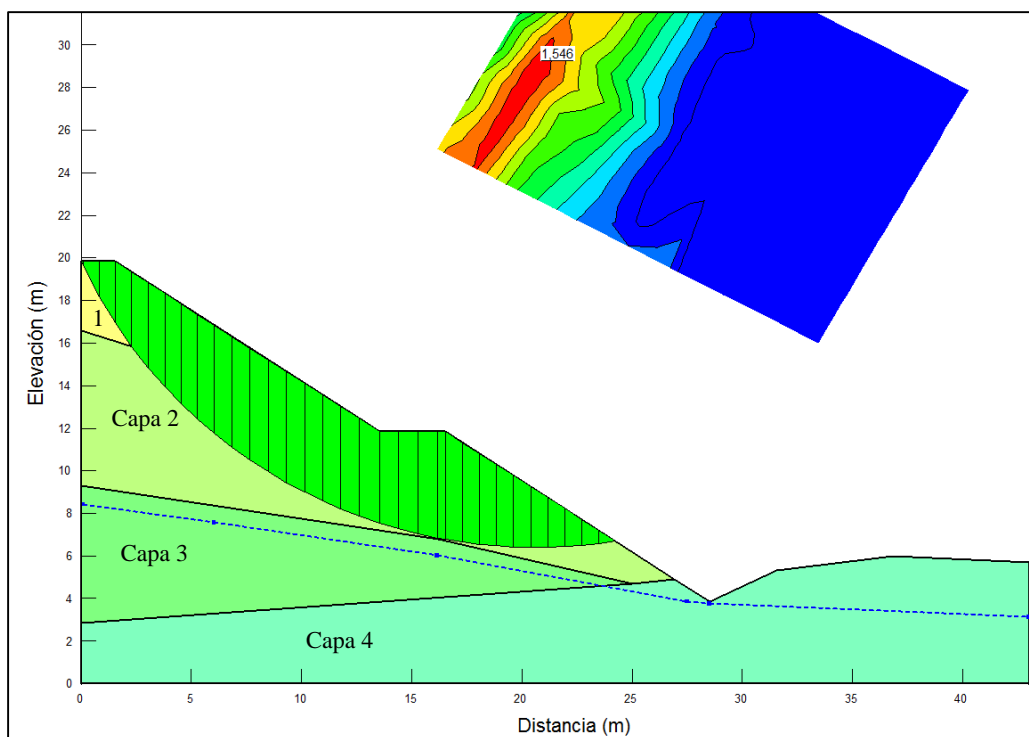


Figura 4.35. Estabilidad del talud T-40 condición frente húmedo

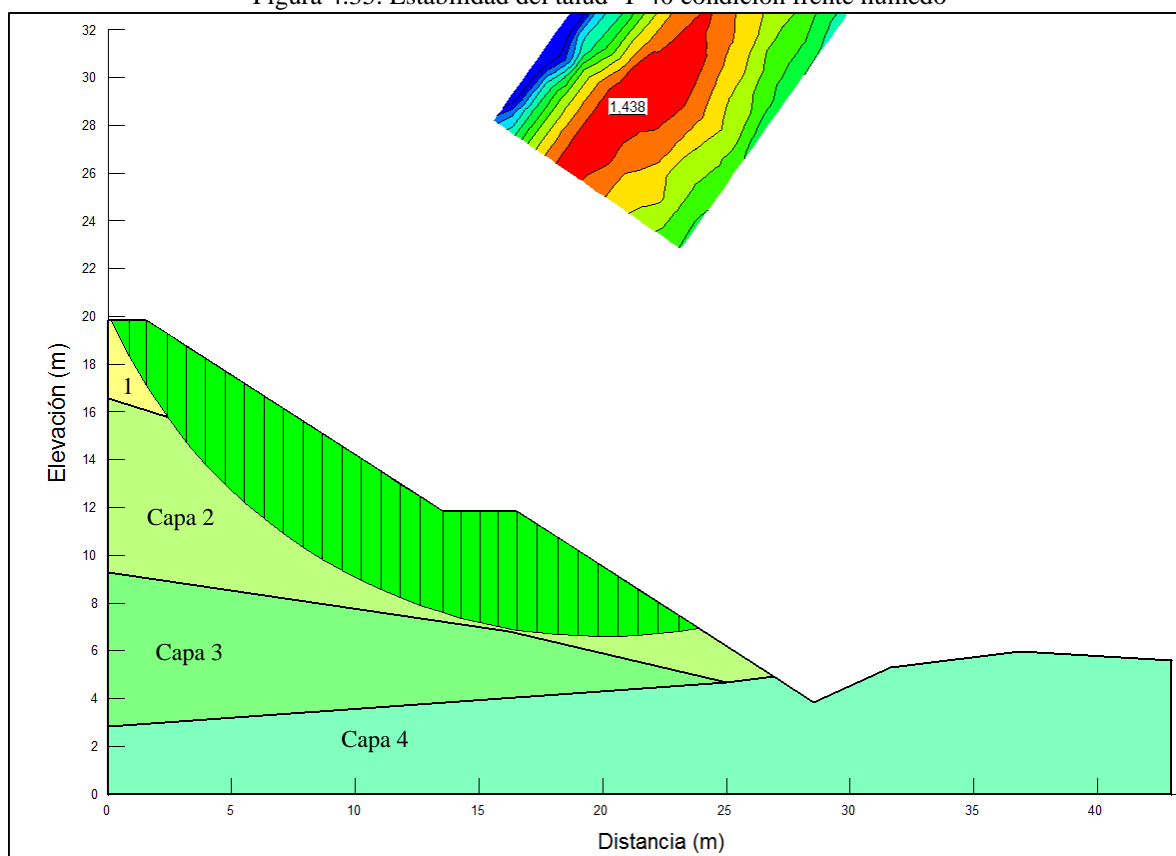


Figura 4.36. Estabilidad del Talud T-40 condición pseudoestática

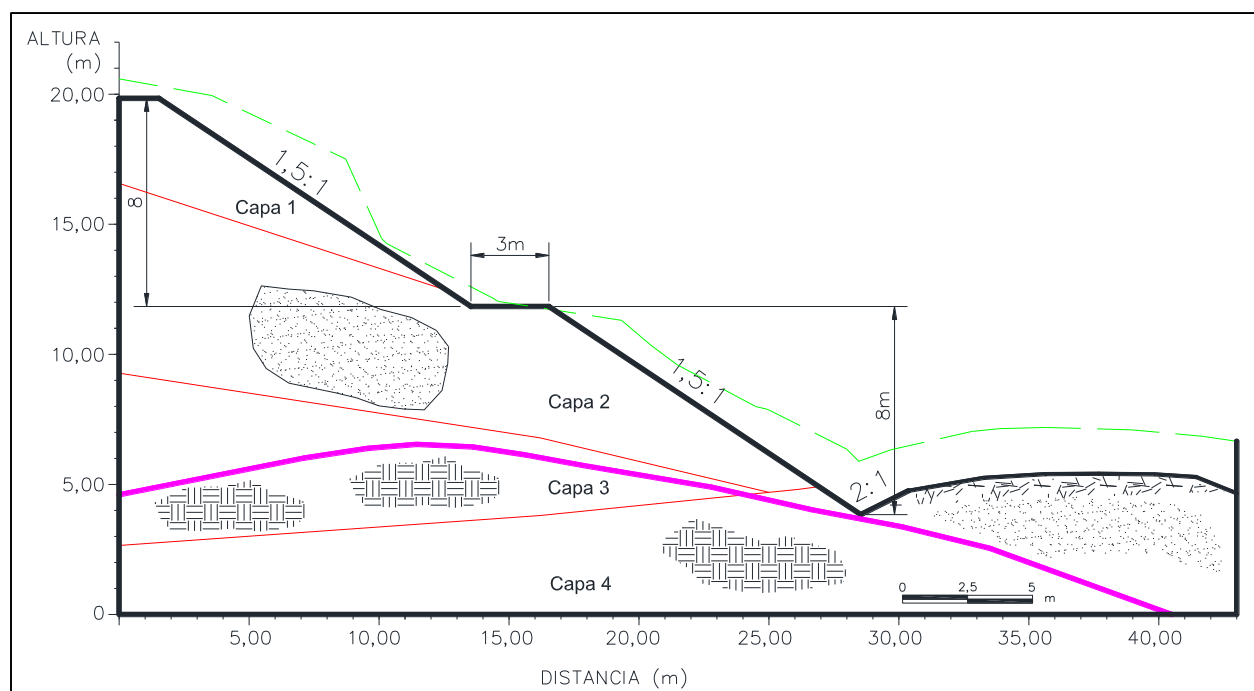


Figura 4.37. Perfil geotécnico de propuesta de solución para el talud T-40

Talud T-56

De acuerdo con lo modelado, donde los factores de seguridad resultantes no han sido excesivos para las configuraciones de las propuestas de solución de los taludes T-8a y T-40, a pesar de que las bermas son buena práctica constructiva, se consideró que no se tienen que construir bermas en taludes menores a 7 m. En este talud se considera una configuración adecuada sin necesidad de construir berma y con una pendiente del 1:1, cumpliendo con los valores del factor de seguridad mínimos recomendados.

En el cuadro 4.33 se muestran los resultados de los factores de seguridad para las cuatro condiciones de análisis de la solución geométrica propuesta y estable que cumplen con los valores mínimos exigidos. En las figuras de la 4.38 a la 4.41 se muestran estas mismas soluciones modeladas en el programa y en la figura 4.42 se tiene el detalle del perfil geotécnico del talud con los detalles de la solución propuesta.

Cuadro 4.33. Factores de seguridad de la solución propuesta talud T-56

Condición	FS solución	FS recomendado	Condición del talud
Estática con NF, c' , ϕ'	1,48	1,40	Estable
Estática sin NF, c' , ϕ'	1,48	1,40	Estable
Estática con NF, frente húmedo, c' , ϕ'	1,41	1,40	Estable
Pseudoestática condición UU	1,25	1,05	Estable

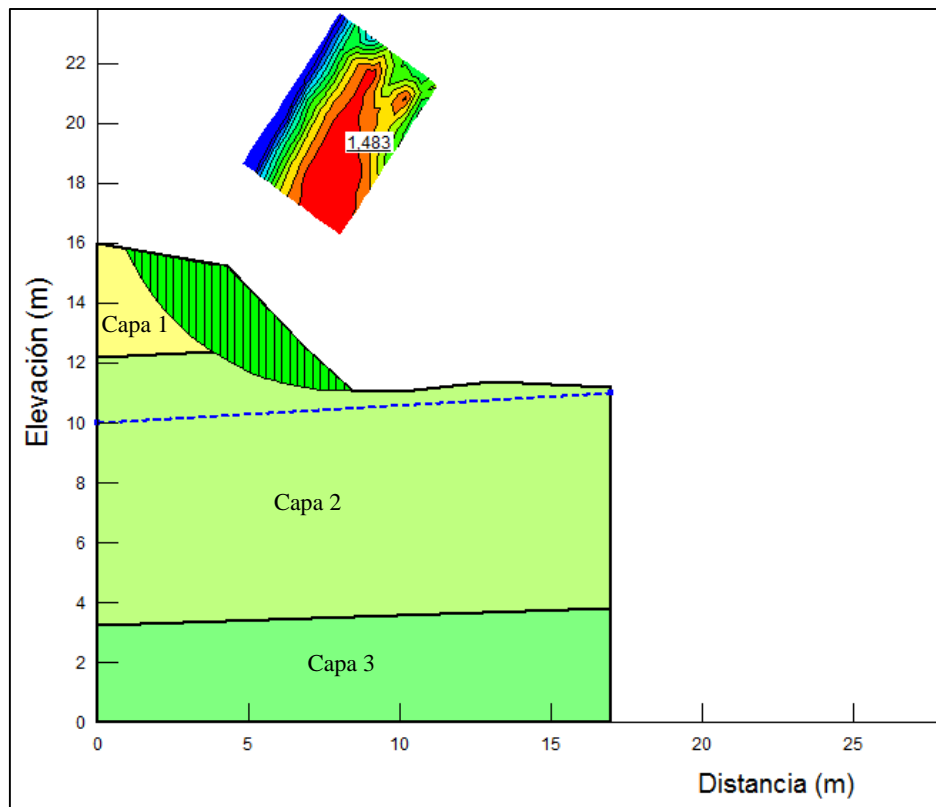


Figura 4.38. Estabilidad del Talud T-56 condición estática con NF

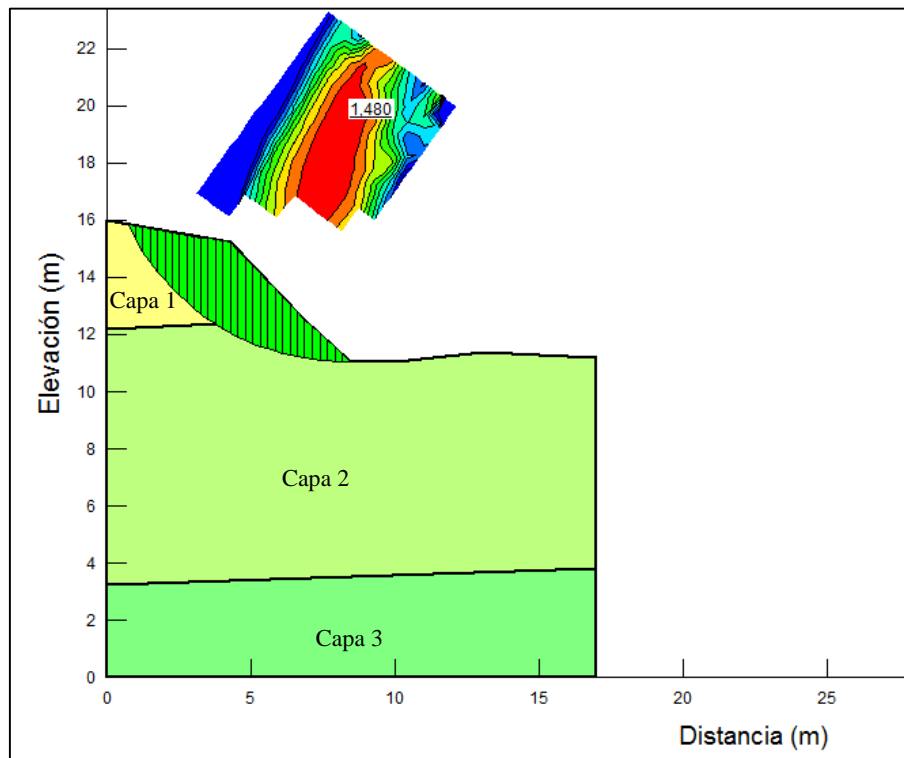


Figura 4.39. Estabilidad del Talud T-56 condición estática sin NF

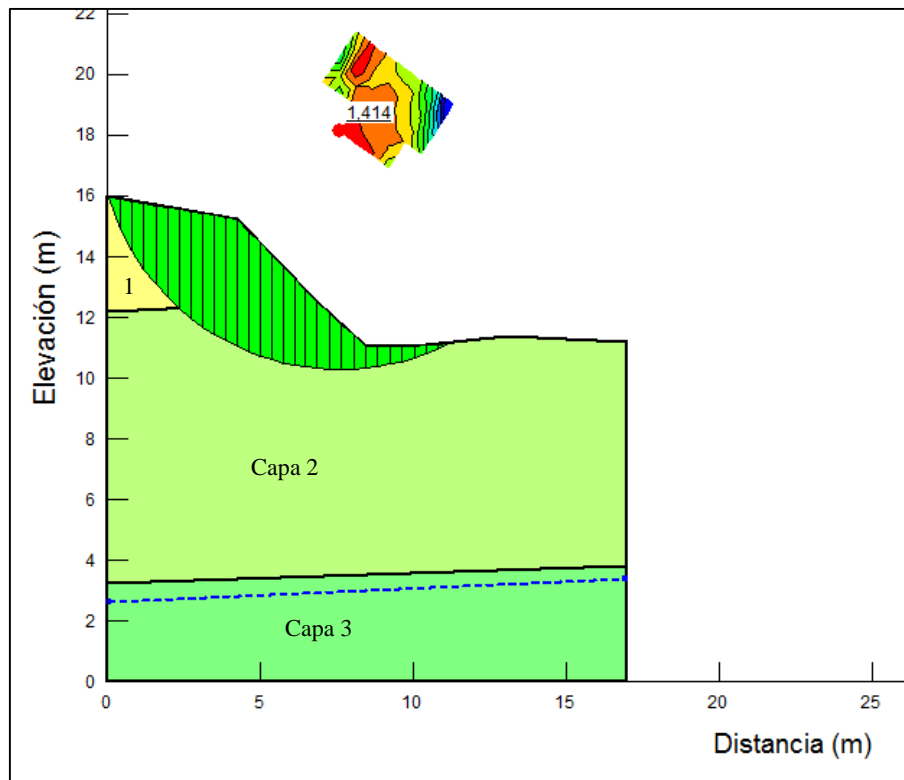


Figura 4.40. Estabilidad del talud T-56 condición frente húmedo

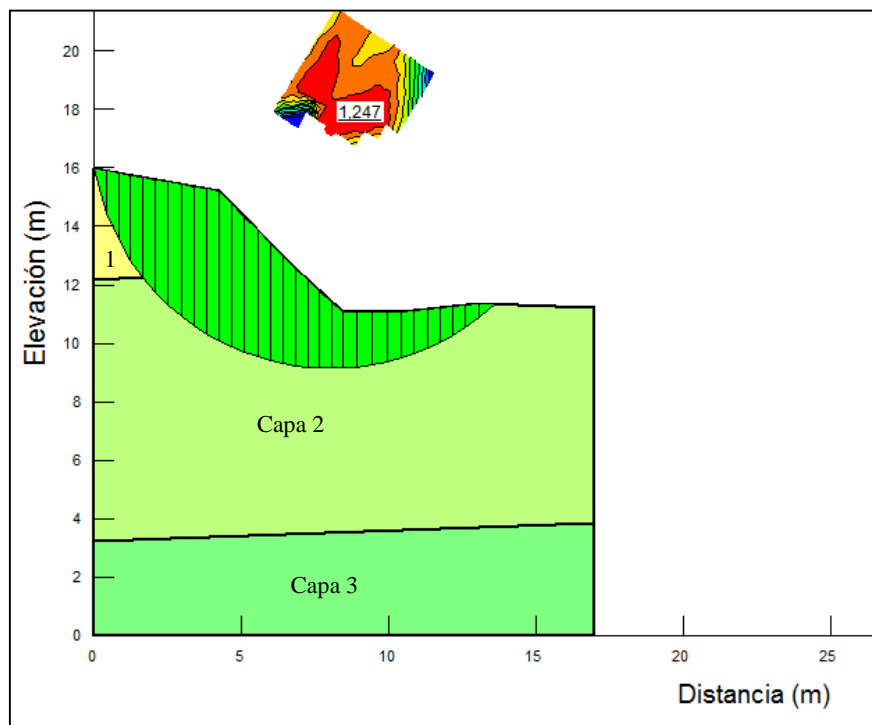


Figura 4.41. Estabilidad del Talud T-56 condición pseudoestática

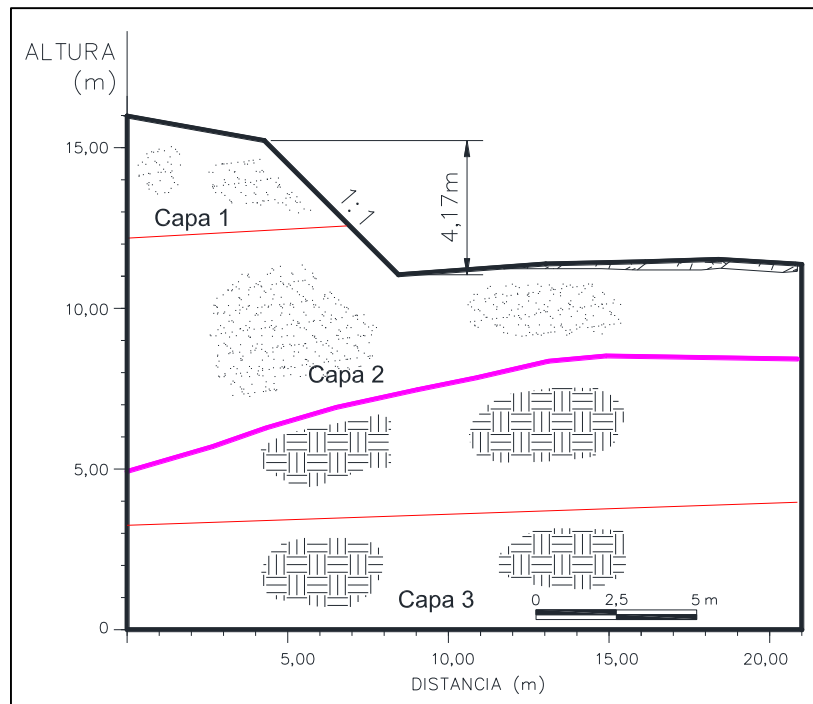


Figura 4.42. Perfil geotécnico de propuesta de solución para el talud T-56

Discusión de los resultados

Con los cálculos realizados se determinó que la condición más crítica para los tres taludes tiende a ser en condiciones estáticas con nivel freático, así como en condiciones estáticas de frente húmedo. En la realidad esta es la situación que se ha presentado a lo largo de los años durante los cuales se han estado observando los taludes. En los resultados obtenidos se puede observar que en la condición pseudostática los tres taludes se encuentran en condiciones estables, con un FS considerablemente superior al mínimo establecido, lo que indica que los suelos y rocas blandas de la ruta No. 856 no fallan por sismo, como se ha observado en la realidad.

Se considera como propuestas de solución adecuadas para los tres taludes las de corrección por geometría, en este caso, mediante construcción de bermas y tendido del ángulo del talud, además de soluciones de drenaje que impidan la saturación y la erosión, como contracunetas en la coronación y canales en las bermas. Se puede considerar la perforación de drenes, subdrenajes e hidrosiembra.

Con el modelado se obtienen variadas soluciones geométricas para los taludes objeto de estudio. Desde la perspectiva del diseño resultan ser soluciones aceptables; sin embargo, desde el punto de vista práctico, no resulta factible debido a la complejidad del proceso constructivo que supone una obra de tal magnitud. Por ello, para tomar en cuenta en los procesos constructivos que se realicen sobre la ruta y ejecutar de una manera estandarizada, segura, funcional y económica los trabajos de estabilidad de taludes propuestos, se sugiere considerar lo anotado en el cuadro 4.34, en el cual se muestra un resumen de las recomendaciones definitivas de solución que se propone realizar en los taludes para garantizar su estabilidad.

Cuadro 4.34. Recomendaciones de estabilización de taludes

Recomendación por corrección geométrica	Recomendación de drenaje	Protección contra erosión
Relaciones de talud de 1,5:1.	Construcción de contracunetas, cunetilla en las bermas para impedir la saturación del talud y la erosión, construcción de canales para la colección y descenso de las escorrentías.	Cunetas revestidas, colocación de fibras naturales, revestimiento con hidrosiembra
Bermas de 3 m de ancho por cada 8 m de altura.		

Consideraciones finales

La búsqueda de soluciones a cualquier problema de estabilidad requiere, en principio, un buen diagnóstico, ya que sólo así se podrán aplicar medidas dirigidas e intensivas. Para ello es imprescindible comprender el mecanismo de estabilidad de los taludes.

El análisis de estabilidad de taludes es uno de los problemas más complicados que se presentan en la ingeniería, constituye una actividad compleja en la que se reúnen varias ramas de la ingeniería, por lo que es muy importante la experiencia y el criterio profesional, si se tiene en cuenta que los problemas de estabilidad de taludes no son iguales unos de otros. Por esta razón, dado que existen localmente múltiples condicionantes que provocan la inestabilidad, es de vital importancia realizar los estudios correspondientes.

En Costa Rica ha existido una importante problemática en cuanto a la estabilidad de taludes debido a que el país está ubicado en zona tropical y a las características geológicas que presenta; esto condiciona y repercute en la construcción de obras de infraestructura vial. La gran cantidad de terreno montañoso que constantemente se interviene para el desarrollo de importantes obras viales, ha provocado movimientos significativos de suelo y roca que causan grandes pérdidas humanas, ambientales y económicas al país.

El procedimiento de análisis empleado en esta investigación se considera de gran importancia y utilidad para el análisis de estabilidad de taludes y laderas en suelos y rocas blandas. Se aprovechó el uso de tecnología disponible, como los procedimientos de ensayo y el programa SLOPE/W®. Asimismo, abarca diversos aspectos de interés relacionados con la estabilidad de taludes, como las investigaciones previas, métodos de cálculo y de diseño. Además, se exponen causas de inestabilidad, características mecánicas de los materiales presentes en la zona norte del país, métodos de cálculo y soluciones a los problemas de inestabilidad.

La metodología empleada en este estudio presenta validez porque toma en cuenta los procedimientos mínimos imprescindibles para realizar un análisis de estabilidad de taludes; además, para solucionar los problemas de estabilidad presentados, se aplicaron los requerimientos establecidos en el recientemente publicado *Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica* (2015).

El estudio realizado en la presente investigación es útil para resolver problemas en condiciones similares que se relacionen con problemas de inestabilidad en suelos y rocas blandas, ya que constituye una metodología de aplicación práctica para resolver este tipo de problemas con el fin de lograr un nivel de seguridad adecuado.

A manera general, el procedimiento que se tiene en este estudio es, esencialmente, el mismo para proyectar nuevos taludes seguros, comprobar la seguridad de las laderas y taludes existentes, analizar los taludes fallados y diseñar su reparación. Todo esto permitirá obtener conclusiones dirigidas a garantizar un proyecto de calidad o a proponer una corrección adecuada de una incidencia.

CAPÍTULO 5 . CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

En la presente investigación se realizó un estudio detallado sobre la estabilidad de los taludes en la sección Río Pocosol- Río Infiernillo de la Ruta Nacional No. 856. Esto es importante dado el interés del país, en general, por el desarrollo de la zona y la conclusión a corto plazo de la obra, por lo que estudios como este pueden ayudar a realizar un trabajo con la calidad requerida.

Para clasificar los movimientos de taludes y laderas, el método desarrollado por Varnes (1978) y actualizado por el Transportation Research Board (1996) de los Estados Unidos se considera apropiado para el caso en estudio, tal como se demostró en el desarrollo de esta investigación.

Con base en observaciones que se han realizado a los taludes sobre la ruta No. 856 desde el año 2011 y en los resultados de los ensayos de campo y de laboratorio, se caracterizaron adecuadamente las propiedades físicas y mecánicas de los suelos y rocas blandas, con la combinación de técnicas directas e indirectas propuestas en la metodología de trabajo. Entre estas técnicas se destacan la clasificación geomecánica de los macizos rocosos, las pruebas geofísicas, las pruebas de SPT y la realización de diferentes ensayos de laboratorio con los cuales se pudo demostrar que, en la ruta No. 856, los suelos de los taludes en estudio clasifican como MH y ML sin contenido de gravas y el macizo rocoso como de calidad muy mala.

Ha sido posible identificar y evaluar importantes metodologías nacionales y foráneas. Se analizaron las principales invariantes y aportes en concordancia con el *Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica* (2015), que constituye el aporte más importante en Costa Rica con respecto al tema de estabilidad de taludes. Esto permitió desarrollar una metodología adecuada para el estudio de los taludes objeto de estudio.

Tanto los estudios realizados como la experiencia obtenida son sistematizados, mediante un procedimiento metodológico, para realizar el análisis de la estabilidad de suelos y rocas blandas. Este procedimiento se compone de cuatro etapas que son: estudios preliminares, estudio detallado, modelado y calibración del modelo geotécnico y diseño y recomendaciones constructivas. Estas etapas están dirigidas a evaluar el comportamiento de los taludes compuestos por suelos y rocas blandas en los proyectos de carreteras.

La fiabilidad y correspondencia de los modelos geotécnicos de los taludes en estudio se lograron, con ayuda del programa SLOPE/W®, haciendo uso de los procesos de calibración y retrocálculo, lo que permitió la correspondencia del modelo con el fenómeno físico de los taludes en estudio. El desarrollo de los procesos de calibración física y retrocálculo fueron de gran importancia para validar la fiabilidad y correspondencia de los modelos geotécnicos con el fenómeno físico de los taludes en estudio.

De acuerdo con los análisis de estabilidad de suelos y rocas blandas efectuados, en la zona de estudio existe mayor susceptibilidad a los movimientos de masa en las capas 1 y 2 que están compuestas por suelos y rocas blandas muy alteradas, mientras que las capas 3 y 4 formadas por rocas blandas de alteración media a baja no se ven afectadas por problemas de inestabilidad, lo cual es importante tomar en consideración cuando se efectúen trabajos de corte.

El proceso de calibración del modelo geotécnico mediante la técnica del retrocálculo, haciendo uso de un programa especializado para lograr la convergencia de los resultados del modelo con el problema real, aporta valiosos resultados adicionales a los que provienen de los ensayos de laboratorio, debido a que es probable que los ensayos de laboratorio no reflejen totalmente la situación real a causa de la alteración que sufre la muestra al ser extraída de las condiciones naturales en sitio.

Se pudo evidenciar que los trabajos que se realizaron a los taludes de corte, relacionados con control de erosión y trabajos de movimiento de tierra en años anteriores, no tuvieron los resultados esperados debido a que presentaban condiciones problemáticas como la sombras, ausencia de drenajes e inadecuados procesos

técnico constructivos. De acuerdo con las diferentes condiciones de análisis estudiadas en la presente investigación, los taludes de corte se encontraban en condición inestable.

Las soluciones geométricas obtenidas para solucionar la inestabilidad de los taludes de la ruta No. 856 en estudio se consideran adecuadas para las necesidades presentes en la zona, ya que a través del análisis de los taludes por medio del retrocálculo y la correspondiente calibración de los modelos, se obtuvieron resultados satisfactorios que demuestran que, en el sitio, la inestabilidad se presenta en mayor medida por la acción de las lluvias características de la zona. Esto se reafirma con las observaciones realizadas en la zona desde el año 2011, con las cuales se pudo constatar que las fuertes lluvias produjeron los movimientos de los suelos y las rocas blandas a lo largo de la ruta No. 856.

Se determinó que en la sección de estudio la solución más adecuada al problema de estabilidad de los taludes en suelos y rocas blandas se logra mediante la corrección por geometría, debido a que es la solución más adecuada por economía y por la existencia del corredor fronterizo que constituye un derecho de vía considerable.

5.2. Recomendaciones

Utilizar los valores de γ , c y ϕ obtenidos de los análisis de calibración para analizar la estabilidad de otros taludes en la misma formación geológica de suelos y rocas blandas, especialmente en la zona fronteriza norte, recomendando medidas de estabilización por medio de las propuestas de solución presentadas en este estudio.

Introducir en la práctica investigativa y de proyectos de Costa Rica las principales recomendaciones y resultados del trabajo para la evaluación de los taludes en suelos y rocas blandas, y continuar perfeccionándola con la experiencia práctica, haciendo uso de programas más rigurosos que tengan implementados los métodos numéricos, análisis 3D, o por medio de la instrumentación, que constituye una gran ayuda en el proceso de calibración, pero que requiere de tiempo y recursos económicos.

Dar seguimiento al comportamiento de los taludes a los que se aplica la solución de estabilidad y realizar la comparación de éstos con respecto a los resultados obtenidos de la investigación para determinar cambios y monitorear con instrumentación el comportamiento real del suelo, además, es de gran importancia documentar tanto la información como la experiencia adquirida. Esto permite corroborar el modelo geotécnico y tomar decisiones en cuanto al hallazgo de anomalías y obtención de datos cuyo procesamiento y resultado son útiles para la protección de vidas, infraestructura, inversiones y medio ambiente.

Incluir los conceptos de análisis propuestos en la presente investigación en los carteles de licitación elaborados por el Estado, de manera que se definan mejores términos de referencia que permitan un mayor desempeño en la ejecución de los proyectos viales, con lo cual se eliminan gastos innecesarios al Estado. Aunado a esto, se requiere contar con personal especializado para que, en los proyectos de carreteras desarrollados por el Estado, haya profesionales competentes que dirijan, controlen y tomen mejores decisiones con preparación y conocimiento acerca de los procesos constructivos en los cuales intervienen trabajos de estabilidad de taludes. En este aspecto, una adecuada exploración geotécnica requiere de un grupo interdisciplinario compuesto por topógrafos, ingenieros civiles o de vías, ingenieros geotecnistas, geólogos, geofísicos, hidrólogos, biólogos, ingenieros forestales, geotecnólogos, etc.

Se recomienda valorar la aplicación de otras metodologías que, sobre todo, tomen en cuenta la probabilidad, o metodologías probabilísticas, de tal manera que con un entendimiento mejor de la incertidumbre se logren soluciones más realistas.

CAPÍTULO 6 . REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Aburto, M. & Rodríguez, D. (2012). *Caracterización de la resistencia de un material de banco para su uso como relleno compactado*. Universidad Nacional Autónoma de México, México, DF.
- ACG. (2009). *Código de Cimentaciones de Costa Rica*. (Editorial Tecnológica de Costa Rica, Ed.) (2nd ed.). Cartago, Costa Rica.
- ACG. (2010, May). Reporte de inspección Ruta 27 San José - Caldera. *Asociación Costarricense de Geotecnia*, 01(10), 47.
- ACG. (2015). *Código geotécnico de taludes y laderas de Costa Rica*. (E. T. de C. Rica, Ed.). San José, Costa Rica.
- Alcántara, I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas*, 41, 7–25.
- Alonso, E., Gens, A. & Josa, A. (1990). A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, 40(3), 405–430.
- Alpízar, A. (2012). *Metodología de análisis de estabilidad de taludes para proyectos viales*. San José, Costa Rica.
- Alpízar, A. (2014). Monitoreo de deslizamientos mediante sistemas de auscultación geotécnica. In *Seminario de reparación y restauración de taludes* (p. 47). San José, Costa Rica: Asociación Costarricense de Geotecnia.
- Alva, J. (1994). *Notas sobre Analisis De Estabilidad De Taludes*. Lima, Perú.
- Alva, J. (2011). *Notas sobre análisis de estabilidad de taludes*. (V. López, Ed.). Lima, Perú.
- Álvarez, J., Mesa, M., Recarey, C. & Hernández, O. (2016). Proceso de algoritmo para la calibración matemática. In *16 Convención Científica de ingeniería y arquitectura* (p. 13). La Habana, Cuba: Cujae. <http://doi.org/10.13140/RG.2.1.2735.3124>
- Arellano, R., Bielefeldt, J. & Correa, D. (2012). *Análisis de Taludes Mediante Ensayos y Back Análisis de Fallas*.
- Arrieta, R. (2011). *Proyecto de investigación del sistema de monitorización y alarma contra los deslizamientos etapa I*. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- ASTM International. (1998a). D 2216-98 Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. *Annual Book of ASTM Standards*, 04(08), 1–7. <http://doi.org/10.1520/D2216-10.1.5>
- ASTM International. (1998b). D 3080-98 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained. *Annual Book of ASTM Standards*, 04(08), 1–6.
- ASTM International. (2000). D 5777-00 Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation. *Annual Book of ASTM Standards*, 04(08), 1–14.
- ASTM International. (2001). C 136-01 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. *Annual Book of ASTM Standards*, 04(02), 1–5. <http://doi.org/10.1520/C0136-06.2>
- ASTM International. (2002a). D 4531-02 Standard Test Methods for Bulk Density of Peat and Peat Products. *Annual Book of ASTM Standards*, 04(08), 1–3. <http://doi.org/10.1520/D4531-86R08.2>
- ASTM International. (2002b). D 854-02 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water

- Pycnometer. *Annual Book of ASTM Standards*, 04(08), 1–8. <http://doi.org/10.1520/D0854-10>.
- ASTM International. (2005). D 4318-05 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. *Annual Book of ASTM Standards*, 04(08), 1–14. <http://doi.org/10.1520/D4318-10>.
- ASTM International. (2006a). D 2487-06 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). *Annual Book of ASTM Standards*, 04(08), 1–12. <http://doi.org/10.1520/D2487-11>.
- ASTM International. (2006b). D 6032-02 Standard Test Method for Determining Rock Quality Designation (RQD) of Rock Core. *Annual Book of ASTM Standards*, 14(02), 1–5.
- ASTM International. (2008). D 1586-11 Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils. *Annual Book of ASTM Standards*, 04(08), 1–9. <http://doi.org/10.1520/D1586-11.2>
- ASTM International. (2011). D 4767-11. Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils. *Annual Book of ASTM Standards*, 04(08), 14. <http://doi.org/10.1520/D4767-11>
- ASTM International. (2015). D 2850-15. Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils. *Annual Book of ASTM Standards*, 04(08), 1–7.
- Astorga, A. (1992). Descubrimiento de corteza oceánica mesozoica en el norte de Costa Rica y el sur de Nicaragua. *Revista Geológica de América Central*, 14, 109–112.
- Astorga, A., Fernández, J., Barboza, G., Campos, L., Obando, J., Aguilar, A. & Obando, L. G. (1991). Cuencas sedimentarias de Costa Rica: evolución geodinámica y potencial de hidrocarburos. *Revista Geológica de América Central*, 13, 25–59.
- Ayala, O. (2013). *Aplicación de modelos constitutivos para representar el comportamiento de Tierra Blanca Joven (TBJ), Unidad G*. Universidad de El Salvador.
- Baker, R. (1981). Tensile Strength, tension cracks, and stability of slopes. *Soils and Foundations*, 21(2), 17.
- Barragán, L. (2008). *Manual para el análisis sísmico de estabilidad de taludes utilizando métodos pseudoestáticos y métodos de desplazamiento*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Barrantes, G., Barrantes, O. & Núñez, O. (2011). Efectividad De La Metodología Mora-Vahrson Modificada En El Caso De Los Deslizamientos Provocados Por El Terremoto De Cinchona , Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 47, 141–162.
- Barton, N. (2008). *Combining borehole characterization and various seismic measurements in tunnelling Combinando la caracterización de pozos de sondeo y distintas mediciones sísmicas en la construcción de túneles*. Oslo, Norway.
- Bauzá, J. (2014). El estudio de los problemas de estabilidad en taludes de suelo. In *Seminario de reparación y restauración de taludes* (p. 159). San José, Costa Rica: Asociación Costarricense de Geotecnia.
- Bazán, O. (2012). Tablas geomecánicas. Cajamarca, Perú: ORBASA.
- Bojorque, J. (2010). La aplicación del análisis inverso de deslizamientos como herramienta para la determinación de los parámetros geomecánicos del suelo. *Maskana*, 1(1), 17–40.
- Bonilla, E., Chaves, I., Esquivel, L., Madrigal, J., Méndez, J. & Sjöbohm, L. (2006). *Casos frecuentes de*

- amenaza y vulnerabilidad: Medidas de prevención y mitigación.* San José, Costa Rica.
- Botero, E. & Romo, M. (2006). *Modelo Bidimensional No Lineal Para El Análisis Del Comportamiento Dinámico De Estructuras Tétrreas.* *Revista de Ingeniería Sísmica* (Vol. 074). Retrieved from <http://redalyc.uaemex.mx>
- Campos, J. (2015). *Análisis de estabilidad del deslizamiento en el Bajo Cacao de Atenas.* Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Candela, J. (2012). *Sistemas de estabilización de taludes y laderas.* Grupo Terratest. Madrid, España.
- Carrfon, F. (n.d.). *Deslizamientos por lluvias en Costa Rica.* San José, Costa Rica.
- Castrillón, C. & Quintero, J. (2012). *Guía de instrumentación en taludes inetrvenidos por un proyecto vial.* Medellín, Colombia.
- Castro, D. (2000). *Estudio y analisis de las membranas flexibles como elementos de soporte para la estabilización de taludes y laderas de suelos y/o materiales sueltos.* Universidad de Cantabria.
- Cavada, J. M. (2000). *Guia de prospección sísmica por refracción.* Venezuela.
- Ceballos, F. & Olalla, C. (2014). *Relationship between RMRb and GSI based on in situ data.* Madrid, España.
- CFIA. (2010). *Código Sísmico de Costa Rica 2010.* (Editorial Tecnológica de Costa Rica, Ed.) (4th ed.). Cartago, Costa Rica.
- Chaparro, C. & Vargas, D. (2012). *Determinación del nivel de amenaza por procesos de remoción en masa para un talud ubicado en el barrio San Miguel del Municipio de Bucaramanga mediante un análisis determinístico utilizando la teoría de equilibrio límite.* Universidad Industrial de Santander.
- Cháves, I., Durán, M., Tierra, D. & Soto, D. (2014). *Susceptibilidad de deslizamientos del cantón de Escazú mediante los métodos Mora Vahrson (1992) y las modificaciones Mora et al ., (2002) y Camacho et al ., (2004).* *En Torno a La Prevención*, 13(13), 7–13.
- Cuanalo, O. A., Oliva, A. O. & Gallardo, R. (2011). *Inestabilidad de las laderas influencia de la actividad humana.* *Elementos* 84, 39–46.
- Das, B. (2001a). *Fundamentos De Ingeniería Geotécnica.Pdf.* (S. A. Thomson Editores, Ed.). California.
- Das, B. (2001b). *Principios de ingeniería de cimentaciones.* (I. T. Editores, Ed.) (4th ed.). México: PWS Publishing.
- De Matteis, Á. (2003). *Estabilidad de taludes.* Santa Fe, Argentina.
- Duncan, M., Wright, S. & Brandon, T. (2014). *Soils Strenght and Slope Stability (2).* (I. John Wiley & Sons, Ed.), *Soil Strength and Slope Stability* (2nd ed.). New Jersey, United States.
- Edelbro, C. (2003). *Rock mass strength: a review. Technical Report; Department of Civil Engineering, Division of Rock Mechanics* (Vol. 16).
- Espinoza, C. & Tapia, L. (2013). *Análisis comparativo entre los métodos de estabilidad de taludes aplicados a las presas de tierra del proyecto PACALORI.* Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Fallas, F. & Sáenz, S. (2014). *Pozos profundos de infiltración para la estabilización de taludes.* In *Seminario de reparación y restauración de taludes* (p. 33). San José, Costa Rica.
- Galván, M. (2011a). *Estudio del ensayo a Carga Puntual en materiales calizos de la Comunidad*

Valenciana. Universidad Politécnica de Valencia.

- Galván, M. (2011b). *Estudio del ensayo a carga puntual en materiales calizos de la Comunidad Valenciana. Propuesta de modificación del factor de corrección por tamaño y correlación del $I_s(50)$ con la Resistencia a Compresión Simple*. Universidad Politécnica de Valencia.
- García, J., González, F. & De las Heras, C. (2013). Estudio y estabilización de un talud de gran altura en la autovía A-2 (La Panadella, Barcelona). In E. Alonso, J. Corominas & M. Hürlimann (Eds.), *VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables* (Vol. 1, pp. 35–358). Palma de Mallorca: CIMNE. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- García, M. (2014). Guía general para la reparación y restauración de taludes con movimientos de tierras y drenaje superficial y profundo. In *Seminario y reparación de taludes* (p. 242). San José, Costa Rica: ACG.
- García, M. & Chávez, M. (2007). *Propuestas de Soluciones Técnicas para la Estabilización de Taludes de Roca Blanda en la Vía Guayaquil – Progreso*. Guayaquil, Ecuador.
- Gazel, E., Alvarado, G., Obando, J. & Alfaro, A. (2005). Geología y evolución magmática del arco de Sarapiquí, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 32, 13–31.
- Gomes, J. (2009). *Nodelación y análisis estructural de un puente metálico ferroviario*. Santa Clara.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geologica.pdf*. (P. EDUCACIÓN, Ed.). Madrid, España.
- González, F., García de la Oliva, J. & De las Heras, C. (2013). Estudio de los problemas de inestabilidad y medidas correctoras propuestas para el desmonte 32 en el tramo Enlace de Polopos-Enlace de Albuñol en la autovía del Mediterráneo, A-7, en la provincia de Granada. In E. Alonso, J. Corominas & M. Hürlimann (Eds.), *VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables* (pp. 46–58). Palma de Mallorca, España: CIMNE.
- González, O., Herrera, M., Iglesias, C. & López, E. (2013). *Análisis de los modelos constitutivos empleados para simular la compactación del suelo mediante el método de elementos finitos*. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* (Vol. 22). Cuba.
- Grases, J., Contreras, I. & Grases, G. (1997). Vulnerabilidad de los sistemas de agua potable y alcantarillado frente a deslizamientos, sismos y otras amenazas naturales-caso estudio. Caracas, Venezuela.
- Guerra, C. & Pinzón, J. (2015). *Modelación numérica multiescala de Bimrocks para el análisis de estabilidad de taludes*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Hernández, Y. (2013). *Caracterización y análisis de la amenaza y la vulnerabilidad física por taludes inestables en la microcuenca de la Quebrada Cay, Ibagué, departamento del Tolima*. Universidad de Tolima, Ibagué, Colombia.
- Herrera, M. (2006). *Simulación del comportamiento mecánico de los suelos ferralíticos rojos mediante el método de elementos finitos*. Universidad Agraria de la Habana.
- Hoek, E., Carranza, C. & Corkum, B. (2002). *Hoek-brown failure criterion – 2002 edition*. Narms-Tac.
- Huamán, C. & Aguilar, R. (2001). *Implementacion Del Equipo De Adquisicion De Datos De Prospeccion Sismica*. Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres. Lima, Perú.
- IGME. (1986). *Manual de Taludes*. (EPTISA, Ed.). España.
- IMT. (1998). *Aplicación de un modelo reológico al cálculo de deformaciones permanentes en suelos finos*

- compactados* (Vol. 110). Sanfandila, Qro.
- Iturburu, L. (2015). *Comparación entre la capacidad portante para zapatas corridas obtenidas con los modelos Cam-Clay modificado y Mohr-Coulomb, mediante un análisis determinístico de elementos finitos*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- LanammeUCR. (2013). *Informe de Colaboración técnica LM-PI-UGERVN-009-2013. Ruta Nacional 506 Sección Guacimal-Santa Elena*. San José, Costa Rica.
- López, J. M., Mejía, J. A. & Vega, N. (2008). *Aplicación del método de refracción sísmica para la determinación de velocidades de ondas p*. Universidad de El Salvador.
- López, M., Larrúa, R. & Recarey, C. (2009). *Estimación de la resistencia al cortante longitudinal en lasas compuestas con lámina metálica colaborante* (Vol. 24). Cuba.
- Madrigal, J. (2011). Análisis general del mega-deslizamiento Ortiga-Potrerrillos: Acosta, San José, Costa Rica. *En Torno a La Prevención*, 7(1), 7.
- Manilla, A., Garnica, P. & Pérez, A. (2003). *Evaluación indirecta de los módulos elásticos de rigidez in situ y la relación entre V_p/V_s y el ángulo de fricción interna*. Publicación Técnica. Querétaro, México. Retrieved from <http://trid.trb.org/view.aspx?id=940564>
- Mayne, P., Barry, C. & DeJong, J. (2002). *Subsurface Investigations. Security*. Washington, DC.
- Mende, A. (2014). Appendix B : Data Sheets for all Cut and Fill Slopes along the Route 1856 between Mojón II and Delta Costa Rica.
- Monge, G., Esquivel, L., Campos, N., Méndez, L., Sánchez, H., Rodríguez, M. & Morales, L. (1995). *Deslizamientos, inundaciones, sismos. Litografía e Imprenta Universal, S.A.* San José, Costa Rica.
- Monge, L. & Ramírez, P. (2004). *Mecánica de Rocas : Fundamentos de la Ingeniería de Taludes*.
- Mora, C. (2011). *Contención de taludes en estado viscoplastico*. Universidad Nacional de Colombia.
- Mora, R. (2002). *Deslizamientos Bajo Gamboa, Costa Rica : La posibilidad de una estabilización rentable*. San José, Costa Rica.
- Mora, R. (2006). El deslizamiento de Las Lagunas de Arancibia, Costa Rica: un desastre dos veces anunciado. *Revista EIRD Informa*, 1–6.
- Mora, R. (2010). Estabilidad en condiciones estáticas y probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en condiciones pseudoestáticas de las laderas del Bajo Los Anonos, San Rafael, Escazú, San José. *Ingeniería*, 20(1), 41–49.
- Mora, R. (2014). Contribución del laboratorio de geomecánica de la ECG-UCR al estudio de los deslizamientos en Costa Rica: los últimos 25 años. *Revista Geológica de América Central*, 39–44. <http://doi.org/10.15517/rgac.v0i0.16548>
- Mora, R. & Granados, R. (2012). Análisis de estabilidad de taludes considerando la incertidumbre de los datos: Caso Comunidad de Mansiones de Montes de Oca, San José, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 47(1), 133–141.
- Mora, S. & Mora, R. (1994). Los deslizamientos causados por el terremoto de Limón: Factores de control y comparación con otros eventos en Costa Rica. *Revista Geológica de América Central, Esp.*, 139–152.
- Morales, B. (2012). *Metodología de estabilización de taludes de carreteras*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador.

- Murillo, Á. (2013, April 15). Trocha Fronteriza cambia de cara con obras de recuperación. *La Nación*, p. 4A. San José, Costa Rica.
- Nieto, A., Camacho, J. & Ruiz, E. (2009). Determinación De Parámetros Para Los Modelos Elastoplásticos Mohr-Coulomb y Hardening Soil en Suelos Arcillosos. *Revista Ingenieros Universidad de Medellín*, 8(15), 75–91.
- Obando, T. (2009). *Sistemas de Monitoreo y control de la Estabilidad de Taludes Rocosos y Suelos*. Huelva, España.
- Oliva, A. (2015). *Estabilidad de taludes y laderas. Análisis cuantitativo y cualitativo*. Quito, Ecuador.
- Oliva, A. (2015a). *Estabilidad de taludes y laderas. Análisis cuantitativo y cualitativo*. Tijuana, México.
- Oliva, A. (2015b). *Instrumentación y control de taludes y laderas*. Tijuana, México.
- Oporto, R. (2006). *Estudio de fenómenos de remoción en masa. Sector Niebla- San Ignacio Comuna de Valdivia Xª Región*. Universidad Austral de Chile.
- Ortuño, L. (2004). *Estabilización De Taludes En Suelo*. Sevilla, España.
- Ortuño, L. (2010). *Estabilización de taludes mediante pilotes*. Mendoza, Argentina.
- Oviedo, S. (2015, June 3). Ruta 27 cerrada por derrumbes en kilómetro 45. *La Nación*, p. 2. San José, Costa Rica. Retrieved from [HTTP://www.nacion.com/SUCESOS/DESASTRES/RUTA-CERRADA-](http://www.nacion.com/SUCESOS/DESASTRES/RUTA-CERRADA-)
- Pacheco, A. (2006). *Estabilizacion del talud de la costa verde en la zona del distrito de san isidro*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima. Perú.
- Parra, N. & Ovando, E. (2012). Análisis de la seguridad a largo plazo de un relleno sanitario sobre suelos blandos con modelos 2D y 3D. In *XXVI Reunión nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica* (p. 8). Cancún, México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C.
- Pérez, C. (2005). *Modelización constructiva de comportamiento de materiales compuestos para el uso civil*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Picado, J. (2014). Control de Deformaciones en Taludes Mediante Redes Geodésicas. In *Seminario de reparación y restauración de taludes* (p. 18). San José, Costa Rica.
- Quesada, J. & Ulate, A. (2012). *Informe: INF-PITRA-014-12. Informe de gira de reconocimiento a ruta 1856 - Juan Rafael Mora Porras, trocha fronteriza*. San José, Costa Rica.
- Quezada, D. (2013). *Modelación y diseño de soluciones para la estabilidad de talud en los predios de la Universidad Técnica Particular de Loja*. Universidad Técnica Particular de Loja.
- Raimat, C., Riera, E., Graf, C., Fonseca, R., Fañanas, C. & HürlimannMarcel. (2013). Experiencia de la aplicación de RAMMS para la modelización de flujo tras la aplicación de las soluciones flexibles vx en el barranc de Portainé. In M. H. E. Alonso, J. Corominas (Ed.), *VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables* (pp. 1131–1144). Palma de Mallorca, España: CIMNE.
- Ramírez, R. & Salcedo, Y. (2006). *Comparación de los métodos de esfuerzo-deformación y equilibrio límite en la modelación de estabilidad de taludes utilizando los software Plaxis y Slope/W*. Universidad Industrial de Santander.
- Revelo, V. (2008). *Modelo para la estabilización de taludes en las carreteras del subtrópico del Nor Occidente del Ecuador a fin de evitar accidentes de tránsito y disminuir los costos de operación vehicular*. Universidad Técnica de Ambato.

- Romero, M. (2011). *Propuesta metodológica para la evaluación de estabilización de taludes y terraplenes en proyectos de carreteras*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Samtani, N. & Nowatzki, E. (2006). *Soils and foundations. Reference manual - Volume I*. Arizona, USA.
- Sánchez, J. (2013). *Ecuaciones constitutivas para el cálculo de deformaciones en arcillas sensitivas*. UNAM.
- Sánchez, M. (2009). *Modelo de aplicaciones tecnológicas para la protección de taludes desestabilizados por exceso de humedad en el distrito metropolitano de Quito a fin de disminuir la accidentalidad y congestión vehicular*. Universidad Técnica de Ambato.
- Sanhueza, C. & Rodríguez, L. (2012). Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. *Revista de La Construcción*, 12(1), 17–29.
- Shen, J., Priest, S. D. & Karakus, M. (2012). Determination of Mohr-Coulomb shear strength parameters from generalized Hoek-Brown criterion for slope stability analysis. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(1), 123–129. <http://doi.org/10.1007/s00603-011-0184-z>
- Soriano, C. (n.d.). *Aplicación del ensayo de penetración estándar en la determinación de parámetros geotécnicos de suelos granulares*. Bogotá, Colombia.
- Soto, D., Chaves, I., Durán, M. & Herra, D. (2013). *Susceptibilidad del deslizamiento del cantón de Escazú y análisis a detalle de cinco casos específicos: Palo Campana, Salitrillo, Curio y la cuenca de los ríos Agres y Guayabos*. Universidad de Costa Rica. Retrieved from <http://www.ts.ucr.ac.cr/binarios/doc-escuela/ets-ae-graduacion.pdf>
- Sowers, G. B. & Sowers, G. F. (1972). *Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones*. (E. Limusa-Wiley, Ed.) (3rd ed.). Arcos de Belén, México.
- Suarez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. (Ingeniería de Suelos Ltda, Ed.). Bucaramanga, Colombia.
- Suarez, J. (2012). Clasificación de macizos de roca. Colombia. Retrieved from <http://erosion.com.co/presentaciones/category/56-taludes-en-roca.html>
- Suárez, J. (2009). *Deslizamientos, Análisis Geotécnico Vol. I*. (U. Industrial de Santander, Ed.) (1st ed.). Bucaramanga, Colombia.
- Telford, T. (1991). *Slope stability engineering: developments and applications*. London, England.
- Torreadella, J., Altimir, J., Amigó, J. & Ferrer, P. (2013). Metodología Euroblocv2 para el estudio de desprendimientos rocosos. In J. C. y M. H. E. Alonso (Ed.), *VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables* (pp. 1093–1106). Palma de Mallorca, España: CIMNE.
- Ulloa, A. & Vargas, W. (2007). Vulnerabilidad geotécnica Metodología simplificada para evaluación de vulnerabilidad geotécnica de terraplenes en carreteras de montaña de Costa Rica 1. *Infraestructura Vial*, 18, 11.
- USACE. (2003). *Slope stability*. Washington, DC.
- Valerio, O. (2011). Ensayos triaxiales para suelos. *Métodos Y Materiales*, 1(1), 11.
- Valverde, E. (2010). *Análisis de la influencia de la precipitación en el esfuerzo de succión y la estabilidad de un talud*. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Vieira, B. C., Fernandes, N. F. & Filho, O. A. (2010). Shallow landslide prediction in the Serra do Mar, Sao Paulo, Brazil. *Natural Hazards and Earth System Science*, 10(9), 1829–1837. <http://doi.org/10.5194/nhess-10-1829-2010>

Waterman, D. & Álvarez, A. (2012). *Análisis numérico y la importancia de los modelos constitutivos*. Cancún.

Zeballos, M., Aiassa, G. & Terzariol, R. (2007). *Modelos constitutivos acoplados aplicados a limos no saturados. Mecánica computacional*. Córdoba, Argentina.


CAPÍTULO 7 . APÉNDICES.


APÉNDICE 1. Invariantes metodológicas por autores


Recopilación de invariantes metodológicas y aspectos específicos para el estudio de estabilidad de taludes por autor					
Invariantes metodológicas					
Autor	Estudios geotécnicos preliminares	Estudios geotécnicos detallados	Análisis y diseño de la solución		
			Análisis y modelado	Diseño de la solución	Estudios complementarios y monitoreo
	Riesgo potencial de deslizamiento. Ángulo de los taludes naturales. Tres pasos: Evaluación de datos geológicos , identificación de zonas con alto grado de riesgo y la de finición de taludes potencialmente inestables.	Calicatas Sondeos mecánicos Métodos geofísicos Ensayos <i>in situ</i> y de laboratorio Valoración de costos. Clasificación de suelos, rocas blandas y rocas, resistencia	Método de equilibrio límite Método de las dovelas Método de las deformaciones Uso de programas computacionales Uso de programas computacionales	Geometría Drenaje Elementos resistentes Métodos de construcción	Inclinómetros Extensómetro de hilos o varillas Equipos con sistema de lectura eléctrico y mecánico Control de presiones
IGME (1986)	Diagrama de flujo de Japan Landslide Society en conjunto con profesionales de diferentes áreas: geólogos, hidrólogos, forestales, topógrafos, geotecnólogos. Fotografías Mapas geológicos y topográficos	Topografía, GPS, inclinómetros, extensómetros, piezómetros. Localización de la superficie de falla Reconocimiento del tipo y características del movimiento. Sondeos, toma de muestras, ensayos in situ, geofísica.	Fellenius Bishop Janbu Elementos finitos Análisis en tres dimensiones Falla planar Falla de volqueo	Estructuras de contención Vegetación	Instrumentación Inclinómetros GPS Extensómetros Medidor de agrietamiento Piezómetros Sistemas de alarma
Staurez (1998)	Mapas y fotografías. Recorrido por la zona Realizar el inventario de taludes	Sondeos mecánicos para elaborar perfiles estratigráficos. Ensayos de laboratorio. Localización de la superficie de falla, seguimiento de deformaciones, niveles piezométricos	Análisis retrospectivos: determinación de los parámetros que expliquen la rotura producida	Modificación de la geometría Rellenos al pie del talud Drenaje Refuerzo del terreno	Piezómetros Inclinómetros
Ortúño (2004)	Topografía Clima Información geotécnica: Geología y geomorfología regional, local. Inventario de taludes con problemas	Caracterización geotécnica de los materiales; obtención de datos geotécnicos	Uso del programa SLOPE/W® Back Analysis Análisis de caída de rocas	Propuesta de muros	-
Pacheco (2006)	Literatura básica y específica	Excavaciones Sondeos Ensayos de laboratorio , carga axial y diametral, RCS, Caracterización	Propuesta de correlaciones a partir de ensayos de laboratorio de índice de carga puntual y resistencia a la compresión simple	-	-
Galván (2011)	Tablas de localización y formato para análisis de taludes, boleta de vista de campo. Información visual, verbal y escrita. Topografía	Historial, ensayos de laboratorio y de campo, calicatas, sondeos geotécnicos y geofísicos, estudios hidrogeológicos. Determinación de la superficie de falla. Análisis de estabilidad	Determinar las causas de las fallas con respecto a los grados de saturación. Comparación en estado natural y de falla. Boleta de resultados y análisis.	Geometría Muros Drenaje	-
Romero (2011)	Características y aspectos críticos de estabilidad de taludes. Estudios topográficos	Estudios geológicos; tipo de formación, estructura. Estudios Hidrológicos; Niveles piezométricos, Efectos de la actividad humana Sondeos , clasificación, estudio de las propiedades. Determinación de la superficie de falla	Estado Límite de esfuerzo y de servicio Análisis de costos	Muros claveteados Muros colgados	-
Morales (2012)	Levantamiento topográfico de la zona. Obtención de información geológica	Caracterización geotécnica de los materiales; obtención de datos geotécnicos	Método de elemento finito	Modificación de la geometría Sistema de drenajes Muros Revegetación del talud	-
Quezada (2013)	Inventario de taludes inestables, Mapa conceptual de investigación. Riesgo asociado a vulnerabilidad física (RVF)	Toma de muestras, ensayos de laboratorio	Ábacos de jambú Análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo	Medidas preventivas y correctivas: Vegetación, muros, terrazas, barreras	-
Hernández (2013)	Caracterización del área de estudio: geología, hidrología.	Perforación y toma de muestras: inalteradas Ensayos de campo, ensayos de laboratorio. Caracterización geotécnica de los materiales; propiedades geomecánicas	Uso del SLOPE/W® Análisis de filtración	Soluciones geométricas	-
Espinoza y Tapia (2013)					


Recopilación de invariantes metodológicas y aspectos específicos para el estudio de estabilidad de taludes por autor						
Invariantes metodológicas			Análisis y diseño de la solución			
Autor	Estudios geotécnicos preliminares	Estudios geotécnicos detallados	Análisis y modelado	Diseño de la solución	Estudios complementarios y monitoreo	
Internacionales						
García, (2014)	Estudio geotécnico y geomorfológico. Diseño conceptual para mejorar la estabilidad Seleccionar el sitio preferible para las obras	Diseño y ejecución de la investigación detallada	Revisión del diseño y selección del método optimo de estabilización. Diseño detallado	Movimiento de tierras Drenajes Muros	Instalar sistemas de monitoreo Monitoreo periódico	
Bauzá (2014)	Reconocimiento del entorno. Topografía Inventario de taludes: fichas Localización de superficie de deslizamiento Estudio de niveles piezométricos	Sondeos. Calicatas Ensayos de laboratorio Análisis químico Auscultación geotécnica	Análisis retrospectivo Uso de programas: Plaxis®, SLOPEW®	Soluciones geométricas	Instrumentación ¿Donde queda la experiencia adquirida? Sistematización de datos relevantes	
Mora, (2002)	Marco geológico Fallas geológicas	Propiedades mecánicas del macizo rocoso	Análisis de la estabilidad de la ladera: Bishop, Fellenius y Janbu	Explotación del material y manejo del agua. Beneficios del proceso	-	
Ulloa y Vargas, (2007)	Análisis de la topografía Estudios de geometría típica	Propiedades geotécnicas de los suelos	Evaluación de la estabilidad: Bishop, Janbu modificado. Análisis condiciones drenadas, no drenadas, pseudostático.	Bloques Materiales livianos.	-	
Valverde, (2010)	Selección del sitio. Datos históricos Topografía. Características geométricas	Mustros de campo y ensayos de laboratorio, Modelo geotécnico. Instalación de pluviómetros, tensómetros.	Fellenius y Bishop. Determinístico y Probabilístico Curva característica del suelo	Modificación de la geometría Drenaje Anclajes Muros	Instrumentación Inclinómetros Tensiómetros Pluviómetros	
Mora, (2010)	Geología Geomorfología.	Unidades geotécnicas a partir de sondeos, mustros y ensayos de laboratorio	Condiciones estáticas y pseudostáticas y probabilidad de ocurrencia. Uso de PISA, programas de la US Forest Service, efectos de la resistencia de las raíces.	-	-	
Mora & Granados, (2012)	Marco geológico.	Propiedades físicas y mecánicas de los suelos volcánicos	Programa PC-SLOPE, Parámetros de entrada difusos: método cualitativo	Refuerzo del talud debido a sus condiciones pseudostáticas	-	
Soto, Chaves, Durán, & Herra, (2013)	Recopilación y corroboración de la geología existente, geomorfología al detalle. Riesgo: Zonificación de la susceptibilidad al deslizamiento. Principales elementos de riesgo.	Muestras de suelos por formación geológica para análisis físicos.	Análisis del uso actual de la tierra Tendencia al crecimiento industrial con respecto a áreas de susceptibilidad a deslizamiento. Mora Vahson, Mora Vahson Mora	-	-	
Campos, (2015).	Consultas bibliográficas Consultas sobre métodos de análisis y parámetros a utilizar. Visita de campo Topografía.	Pruebas de campo Obtención de muestras Ensayos de laboratorio	Modelado con GeoSLOPE® , MEL Esfuerzos efectivos Esfuerzos totales Retroanálisis	Sistemas de drenaje Reforestación	Inspección de obras de retención	
	Estudios disponibles Inspección inicial de las condiciones del talud Estudios complementarios: Topografía, geología	Planificación de la investigación Complejidad geotécnica Investigación geotécnica según la etapa Investigaciones: de campo y laboratorio	Identificación y caracterización del proceso. Definición del modelo geotécnico. Métodos de análisis: Equilibrio límite, numéricos, cinemáticos, probabilísticos, deformaciones, licuación, erosión, retroanálisis , por precedente, observacional, flujos y avalanchas.	Movimiento de tierra Drenajes Muros Estructuras ancladas Estructuras enterradas Pilas Revestimiento Barreras	Instrumentación geotécnica: Control de desplazamientos, localización de la superficie de falla, abertura de fracturas, medición de cargas, precipitación, caudales, aceleraciones	
Código geotécnico de taludes y laderas de Costa Rica (2015)						


APÉNDICE 2. Fichas de observación de campo de los taludes


01. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-01			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas	E	N	Se aprecia 1,0 m de suelo residual de color rojizo y características limosas. Le subyace una turbidita estratificada, con yacencia en el sentido de la pendiente. Color rojizo predominante, con laminación en diferentes tonos, en fisuras aparecen manchas de oxidación negruzcas.
CRTM05	460991	1215470	
Altura Talud	± 4-5	m	
Longitud	200	m	
Litología	Turbidita		
	Rumbo	Ángulo	Lado Izquierdo: En la explanación posee malla con fibra de coco que se ha degradado y erosionado el suelo sin resultados positivos.
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	
	Nivel		
Meteorización	IV-VI		Apto RMR
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	Cárcavas de erosión y pequeños surcos.		
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			


02. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-02			Rasgos geológicos Aproximadamente 1,0 m de suelo. Se observan unos 2,0 m de una turbidita con horizontes en serie bien definidas de 0,6 m a 0,7 m. En la base: se aprecia una turbidita más compacta con laminación centimétrica y decimétrica. Se aprecia un deslizamiento en la capa superior de turbidita. Pendiente del talud unos 70°-80°. No posee medidas de protección con geosintéticos. Apto RMR Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas CRTM05	E	N	
	461022	1215471	
Altura Talud	± 6	m	
Longitud	80	m	
Litología	Turbidita		
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	
	Nivel		
Meteorización	V-VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	Cárcavas de erosión y pequeños deslizamientos.		
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			


03. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-03			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas	E	N	En superficie aparece una capa de suelo residual limosa de alta plasticidad y color rojizo. Suelo laterítico de espesor variable de 0,5-1,0 m.
CRTM05	460999	1215326	
Altura Talud	± 5	m	
Longitud	150	m	
Litología	Turbidita		El material rocoso in situ es de características turbidíticas, presentando secuencias que van de la arenisca a la lutita. Generalmente la estratificación es milimétrica y centimétrica. El el corte se aprecian dos niveles de erosión del proceso sedimentario entre ambos aparecen horizontes de 1,5 m de espesor. El horizonte superior es mucho más alterado.
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	Aplicar RMR
	Nivel		
Meteorización	V-VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?	X		Conus talus, surcos de erosión.
Rasgos erosivos y otras observaciones			
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado/ V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			


04. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-04			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas	E	N	En superficie aparece una capa de suelo residual limosa de alta plasticidad y color rojizo. Suelo laterítico de espesor variable de 1,0-2,0 m.
CRTM05	461015	1215388	
Altura Talud	± 3	m	
Longitud	180	m	
Litología	Turbidita		El material in situ de características turbidíticas, presentando secuencias de sedimentos muy finos y alterados con colores rojizos y amarillentos con pequeñas vetas gris verdosas.
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
	Nivel		
Meteorización	VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?	X		
Rasgos erosivos y otras observaciones	Conus talus, surcos de erosión y deslizamientos pequeños.		
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			


05. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-06			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas	E	N	En superficie aparece una capa de suelo residual limosa de alta plasticidad y color rojizo. Suelo laterítico de espesor variable de 0,5-1,0 m.
CRTM05	461115	1215267	
Altura Talud	± 4-5	m	
Longitud	200	m	
Litología	Turbidita		El material rocoso in situ es de características turbidíticas, presentando secuencias que van de la arenisca a la lutita. Generalmente la estratificación es milimétrica y centimétrica. En el corte se aprecian que los horizontes de turbidita aparecen depositados de niveles de erosión horizontales ó sub horizontales. Existen horizontes visibles de 1,0 m a 3,0 m. El horizonte superior del corte aparece más alterado
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	Subhorizontal	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	
	Nivel		
Meteorización	V-VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?	X		Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
Rasgos erosivos y otras observaciones	Conus talus, surcos de erosión y deslizamientos pequeños.		
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			


07. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-09			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas CRTM05	E	N	En superficie aparece una capa de suelo residual limosa de alta plasticidad y color rojizo. Suelo laterítico de espesor variable de 1,0-2,0 m.
	461559	1215007	
Altura Talud	± 3-3,5	m	
Longitud	80	m	
Litología	Turbidita		El material in situ de características turbidíticas, presentando secuencias de sedimentos muy finos y alterados con colores rojizos y amarillentos con pequeñas vetas gris verdosas.
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
	Nivel		
Meteorización	VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?	X		Rasgos erosivos y otras observaciones
	Conus talus, surcos de erosión y deslizamientos pequeños.		
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			


08. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-10			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas	E	N	<p>En superficie aparece un suelo residual de características limosas y de color rojizo de aproximadamente 1,0 m de espesor. Le subyace un sedimento turbidico estratificado en la que los lentes de arenisca presentan resistencia a la compresión de 5-10 MPa y una yacencia subhorizontal.</p> <p>Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.</p>
CRTM05	461614	1214951	
Altura Talud	± 2,5	m	
Longitud	100	m	
Litología	Turbidita		
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento			
	Nivel		
Meteorización	IV-VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	Surcos de erosión y Conus talus.		
FOTOGRAFÍA			
			
<p>I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual</p>			


09. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-11			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas	E	N	En superficie aparece una capa de suelo residual limosa de alta plasticidad y color rojizo. Suelo laterítico de espesor variable de 1,0-2,0 m.
CRTM05	461675	1214952	
Altura Talud	± 3,5	m	
Longitud	130	m	
Litología	Turbidita		El material in situ de características turbidíticas, presentando secuencias de sedimentos muy finos y alterados con colores rojizos y amarillentos con pequeñas vetas gris verdosas.
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
	Nivel		
Meteorización	VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	Conus talus, surcos de erosión y deslizamientos pequeños.		
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			


10. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-12			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas CRTM05	E	N	En superficie aparece una capa de suelo residual limosa de alta plasticidad y color rojizo. Suelo laterítico de espesor variable de 0,50-0,80 m.
	461786	1214741	
Altura Talud	± 4	m	
Longitud	130	m	
Litología	Turbidita		El material in situ de características turbidíticas, presentando secuencias de sedimentos muy finos y alterados con colores rojizos y amarillentos con pequeñas vetas gris verdosas. En el corte aparecen secuencias de gran aporte de pómez blanco y material volcánico de caída.
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
	Nivel		
Meteorización	V-VI		
Humedad	Muy Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	Conus talus, surcos de erosión.		
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			


11. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-13			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas	E	N	En superficie aparece una capa de suelo residual limosa de alta plasticidad y color rojizo. Suelo laterítico de espesor variable de 0,40-0,60 m.
CRTM05	461871	1214663	
Altura Talud	± 3,5	m	
Longitud	100	m	
Litología	Turbidita		El material in situ de características turbidíticas, presentando secuencias de sedimentos muy finos y alterados con colores rojizos y amarillentos con pequeñas vetas gris verdosas. En la base del corte aparecen secuencias de gran aporte de pómez blanco y material volcánico de caída.
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
	Nivel		
Meteorización	V-VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	Conus talus, surcos de erosión y deslizamientos pequeños.		
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			


12. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-14			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas CRTM05	E	N	En superficie aparece un suelo residual de características limosas y de color rojizo de aproximadamente 1,0 m de espesor. Le subyace un sedimento turbidico estratificado con yacencia subhorizontal.
	461988	1214483	
Altura Talud	± 10	m	
Longitud	250	m	
Litología	Turbidita		
	Rumbo	Ángulo	Semiroca a roca en la base. Pendiente a proximadamente entre 70°-80°. Resistencia a la compresión: 20-40 MPa
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento			
	Nivel		
Meteorización	IV-VI		Se presentan pequeños desprendimientos de bloques. 100 m antes del punto el material se comporta como suelo y se aprecia un deslizamiento de masa.
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	Surcos de erosión y Conus talus.		Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			


13. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-15			Rasgos geológicos En superficie aparece 1,0 m de suelo residual de color rojizo. Le subyace una secuencia turbidítica con predominio de lentes de arenisca que se comporta como una semiroca a roca en talud. Pendiente del talud entre 60°-70°. Resistencia a la compresión de 10-20 MPa. El talud se comporta relativamente estable. Alteraciones : Oxidación - lixiviación.
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas CRTM05	E	N	
	462129	1214290	
Altura Talud	± 6	m	
Longitud	100	m	
Litología	Turbidita		
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	
	Nivel		
Meteorización	IV-VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	Erosión leve		
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			


14. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-17			Rasgos geológicos En superficie aparece 1,0 m a 1,50 m de suelo residual de color rojizo. Le subyace una secuencia turbidítica con predominio de lentes de arenisca que se comporta como una semiroca a roca en talud. Pendiente del talud entre 50°-60°. Resistencia a la compresión de 5-10 MPa. Apto RMR Alteraciones : Oxidación - lixiviación.
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas CRTM05	E	N	
	462413	1213830	
Altura Talud	± 5	m	
Longitud	180	m	
Litología	Turbidita		
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	
	Nivel		
Meteorización	IV-VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	Cárcavas de erosión y un deslizamiento de masa.		
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			


15. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-19			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas	E	N	<p>Espesor de suelo es de aproximadamente 0,30-0,40 cm. Por debajo del mismo se aprecian unos 6,0 m de una serie estratigráfica sedimentaria con predominio de lentes de arenisca de 1,0 m de espesor, y en ocasiones centimétricos. Resistencia a la compresión de la arenisca de 10-40 MPa.</p> <p>En la base: Se observa un flujo de lava andesítica o cuerpo de diabasas. Resistencia a la compresión entre 50-100 MPa</p> <p>Aplicar RMR</p> <p>Alteraciones : Oxidación - lixiviación.</p>
CRTM05	462499	1213595	
Altura Talud	± 7	m	
Longitud	150	m	
Litología	Turbidita		
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	7-23	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	Varias	
	Nivel		
Meteorización	III-VI		<p>Alteraciones : Oxidación - lixiviación.</p>
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	Cárcavas de erosión y desprendimientos de bloques		
FOTOGRAFÍA			
			
<p>I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual</p>			


16. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-20			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas	E	N	<p>En superficie aparece una capa de suelo residual limosa de alta plasticidad y color rojizo. Suelo laterítico de espesor variable de 0,80-1,00 m.</p> <p>El material in situ de características turbidíticas, presentando secuencias de sedimentos muy finos y alterados con colores rojizos y amarillentos con pequeñas vetas gris verdosas. En la base del corte aparecen secuencias de gran aporte de pómez blanco y material volcánico de caída.</p> <p>Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.</p>
CRTM05	462450	1213624	
Altura Talud	± 3-3,5	m	
Longitud	110	m	
Litología	Turbidita		
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	
	Nivel		
Meteorización	VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	Conus talus, surcos de erosión y deslizamientos pequeños.		
FOTOGRAFÍA			
			
<p>I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual</p>			


17. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-21a			Rasgos geológicos Se aprecia un flujo de lavas en la que la roca de caja son las turbiditas circundantes las que generalmente estan constituidas por areniscas en lentes estratificados que alcanzan resistencia a la compresión entre 10-40 MPa. La lava de composición basáltica, muy dura presenta megafenocristales de olivino hasta en un 5% con espinela y golfos de corrosión o reabsorción, trazas de plagioclasas, piroxenos. Alteraciones : Oxidación.
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas CRTM05	E	N	
	462224	1213358	
Altura Talud	± 7-8	m	
Longitud	240	m	
Litología	Turbidita y lavas		
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	Varias	
	Nivel		
Meteorización	I-VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?	X		
Rasgos erosivos y otras observaciones	Cárcavas de erosión y desprendimientos de bloques		
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			


18. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-22			Rasgos geológicos Superficie con suelo residual en espesores de 1,0 m a 1,50 m de características limosas y color rojizo. Le subyace una turbidita fina, estratificada, alterada, presenta abundante aporte de material volcánico de caída, ceniza y pómez. Posee siembra de vetiver. Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas CRTM05	E	N	
	461974	1213096	
Altura Talud	± 5	m	
Longitud	120	m	
Litología	Turbidita		
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	
	Nivel		
Meteorización	V-VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?	X		
Rasgos erosivos y otras observaciones	Cárcavas de erosión y conos talus y deslizamientos pequeños.		
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			


19. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-23			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas	E	N	<p>En superficie aparece un suelo residual de características limosas y de color rojizo, su espesor alcanza los 2,0 m. Le subyace un sedimento turbidítico muy fino con lentes milimétricos y centimétricos con colores rojizos, amarillentos y algunos lentes gris-blancuzcos.</p> <p>Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.</p>
CRTM05	461773	1212671	
Altura Talud	± 3-4	m	
Longitud	90	m	
Litología	Turbidita		
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	
	Nivel		
Meteorización	VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	Cárcavas de erosión y conos talus y deslizamientos pequeños.		
FOTOGRAFÍA			
			
<p>I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado/ V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual</p>			


20. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-24a			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas CRTM05	E	N	En superficie aparece una capa de suelo residual limosa de alta plasticidad y color rojizo. Suelo laterítico de espesor variable de 0,80-1,00 m.
	461868	1212450	
Altura Talud	± 4	m	
Longitud	80	m	
Litología	Turbidita		El material in situ de características turbidíticas, presentando secuencias de sedimentos muy finos y alterados con colores rojizos y amarillentos con pequeñas vetas gris verdosas. En el corte se aprecian dos niveles de sedimentos turbidíticos, el superior de aproximadamente 1,50 m de mayor consolidación, de color rojizo. Se encuentra sobre una superficie de erosión. El horizonte inferior es más arcilloso y mayor plasticidad.
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	
	Nivel		
Meteorización	VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
Rasgos erosivos y otras observaciones	Conus talus, surcos de erosión y deslizamientos pequeños.		
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			


21. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-25			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas	E	N	En superficie aparece una capa de suelo residual limosa de alta plasticidad y color rojizo. Suelo laterítico de espesor variable de 0,40-0,60 m.
CRTM05	461910	1212290	
Altura Talud	± 3	m	
Longitud	130	m	
Litología	Turbidita		El material in situ de características turbidíticas, presentando secuencias de sedimentos muy finos y alterados con colores rojizos y amarillentos con pequeñas vetas gris verdosas.
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
	Nivel		
Meteorización	VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	Conus talus, surcos de erosión		
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			


22. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-26			Rasgos geológicos En superficie aparece una capa de suelo residual limosa de alta plasticidad y color rojizo. Suelo laterítico de espesor variable de 0,40-0,50 m. El material in situ de características turbidíticas, presentando secuencias de sedimentos muy finos (milimétricos y centimétricos) y alterados con colores rojizos y amarillentos con pequeñas vetas gris verdosas. En el corte se aprecian materiales de caída y aporte de algunos fragmentos. Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas	E	N	
CRTM05	461919	1215105	
Altura Talud	± 5-6	m	
Longitud	160	m	
Litología	Turbidita		
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	
	Nivel		
Meteorización	VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?	X		
Rasgos erosivos y otras observaciones	Conus talus, surcos de erosión.		
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			


23. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-27			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas	E	N	<p>En superficie aparece una capa de suelo residual limosa de alta plasticidad y color rojizo. Suelo laterítico de espesor variable de 0,40-0,60 m.</p> <p>El material in situ de características turbidíticas, presentando secuencias de sedimentos finos. La estratificación es monoclinal en ángulos de 30°-40°, los lentes centimétricos y decimétricos. Algunos horizontes de arenisca se comportan como semiroca. En el corte se aprecian materiales de caída y pómez así como arcillitización.</p> <p>Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.</p>
CRTM05	461969	1211888	
Altura Talud	± 5	m	
Longitud	120	m	
Litología	Turbidita		
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	
	Nivel		
Meteorización	V-VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	Conus talus, surcos de erosión.		
FOTOGRAFÍA			
			
<p>I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual</p>			


24. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-28			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas CRTM05	E	N	En superficie aparece un suelo residual de características limosas y de color rojizo, su espesor alcanza los 1,0 m. Le subyace un sedimento turbidítico muy fino con lentes milimétricos y centimétricos con colores rojizos, amarillentos y algunos lentes gris-blancuzcos.
	461707	1210975	
Altura Talud	± 4-5	m	
Longitud	100	m	
Litología	Turbidita		
	Rumbo	Ángulo	<p>En la base la turbidita es más consistente con predominio de arenisca. Posee siembra de vetiver.</p> <p>Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.</p>
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	
	Nivel		
Meteorización	V-VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?	X		
Rasgos erosivos y otras observaciones	Cárcavas de erosión y conos talus.		
FOTOGRAFÍA			
			
<p>I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual</p>			

25. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-29			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas CRTM05	E	N	<p>En superficie aparece un suelo residual de características limosas y de color rojizo, su espesor alcanza los 1,0 m. Le subyace un sedimento turbidítico muy fino con lentes milimétricos y centimétricos con colores rojizos, amarillentos y algunos lentes gris-blancuzcos.</p> <p>Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.</p>
	461803	1210742	
Altura Talud	± 3	m	
Longitud	80	m	
Litología	Turbidita		
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	
	Nivel		
Meteorización	VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	Cárcavas de erosión y conus talus.		
<p style="text-align: center;">FOTOGRAFÍA</p> 			
<p>I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado/ V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual</p>			


26. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-30			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas CRTM05	E	N	<p>En superficie aparece un suelo residual de características limosas y de color rojizo, su espesor alcanza los 1,20 m. Le subyace un sedimento turbidítico muy fino. Se aprecian horizontes que se repiten cada 0,3-0,50 m de secuencias similares que van de la lutita a la arenisca. Colores predominantes rojizos y amarillentos con lentes gris verdosos. Se aprecian manchas de oxidación amarillentas y negruzcas en los planos de estratificación y las grietas de decompresión.</p> <p>Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.</p>
	461965	1210637	
Altura Talud	± 3-4	m	
Longitud	60	m	
Litología	Turbidita		
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	
	Nivel		
Meteorización	VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	Cárcavas de erosión y conus talus.		
FOTOGRAFÍA			
			
<p>I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual</p>			

27. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-31			Rasgos geológicos En superficie aparece un suelo residual de características limosas y de color rojizo, su espesor alcanza los 1,00 m. Le subyace un sedimento turbidítico muy fino. Se aprecian horizontes que se repiten cada 0,3-0,50 m de secuencias similares que van de la lutita a la arenisca. Colores predominantes rojizos y amarillentos con lentes gris verdosos. Se aprecian manchas de oxidación amarillentas y negruzcas en los planos de estratificación y las grietas de decompresión. Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas CRTM05	E	N	
	461953	1210619	
Altura Talud	± 4	m	
Longitud	100	m	
Litología	Turbidita		
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	
	Nivel		
Meteorización	VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?	X		
Rasgos erosivos y otras observaciones	Cárcavas de erosión y conos talus.		
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			


28. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-32a			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas	E	N	<p>En superficie aparece un suelo residual de características limosas y de color rojizo, su espesor alcanza los 1,00 m- 1,50 m. Le subyace un sedimento turbidítico muy fino. Colores predominantes rojizos y amarillentos con lentes gris verdosos. Se aprecian manchas de oxidación amarillentas y negruzcas en los planos de estratificación y las grietas de decompresión. El talud fue tratado con geosintético y siembra de vetiver.</p> <p>Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.</p>
CRTM05	462198	1210549	
Altura Talud	± 8	m	
Longitud	130	m	
Litología	Turbidita		
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	
	Nivel		
Meteorización	V-VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?	X		
Rasgos erosivos y otras observaciones	Cárcavas de erosión y conos talus y deslizamientos de masa.		
FOTOGRAFÍA			
			
<p>I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual</p>			


29. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-33			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas	E	N	<p>En superficie aparece una capa de suelo residual limosa de alta plasticidad y color rojizo. Suelo laterítico de espesor variable de 1,00-1,30 m.</p> <p>El material in situ de características turbidíticas, presentando secuencias de sedimentos finos. El material se encuentra muy alterado, se observa laminación centimétrica y decimétrica hacia la base con aportes de material volcánico de caída y procesos de arcillitización fuertes.</p> <p>Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.</p>
CRTM05	462431	1210530	
Altura Talud	± 3	m	
Longitud	100	m	
Litología	Turbidita		
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	
	Nivel		
Meteorización	VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	Conus talus, surcos de erosión y deslizamientos pequeños.		
FOTOGRAFÍA			
			
<p>I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual</p>			


30. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-34			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas	E	N	En superficie 1,0 m de suelo residual de características limosas. Le subyace una turbidita estratificada de unos 3,0 m de espesor.
CRTM05	462743	1210364	
Altura Talud	± 4	m	En el corte se aprecian sistemas de secuencia cada 0,50 m, con yacencia subhorizontal.
Longitud	180	m	
Litología	Turbidita		La pendiente del corte es de unos 75°-80°
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	La hidrosiembra aplicada tiene un comportamiento regular, ya que es limitada por la pendiente del corte.
	Nivel	Familias	
Fracturamiento			Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
	Nivel		
Meteorización	V-VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	Numerosos conos talus. Se evidencia erosión ligera.		


FOTOGRAFÍA



I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual


31. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-35			Rasgos geológicos En superficie aparece una capa de suelo residual limosa de alta plasticidad y color rojizo. Suelo laterítico de espesor variable de 1,50-2,00 m. El material in situ de características turbidíticas, presentando secuencias de sedimentos finos. El material se encuentra muy alterado, se observa laminación centimétrica y decimétrica. Los lentes de colores rojizos amarillentos y otros gris verdosos con manchas de oxidación gris verdosas. Se aprecian clastos en el sedimento. Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas CRTM05	E	N	
	462777	1210332	
Altura Talud	± 3-4	m	
Longitud	75	m	
Litología	Turbidita		
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	
	Nivel		
Meteorización	VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	Conos de talus en la base, pequeños surcos erosivos.		
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			

32. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-37			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas CRTM05	E	N	Se aprecia un suelo residual de características limosas de aproximadamente un 1,0 m de espesor.
	463029	1210361	
Altura Talud	± 10	m	Se observa agrietamiento por descompresión en los materiales turbidicos del corte. El talud se encuentra intervenido con vetiver y cobertura parcial con geosintético.
Longitud	300	m	
Litología	Turbidita		Apto RMR
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	Alto		Apto RMR
	Nivel		
Meteorización	V-VI		Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	Apto RMR
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
Rasgos erosivos y otras observaciones	Surcos y cárcavas de erosión. Deslizamientos pequeños		
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			


33. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-39			Rasgos geológicos Lado derecho del talud: De 0,50 m el corte superior es suelo residual color rojizo. El talud se encuentra cubierto con un geosintético con fibra de coco. Lado Izquierdo del Talud: Se observa estratificación del sedimento tubidítico y deslizamientos pequeños. El ángulo de reposo del material deslizado (suelto) es entre 25° y 27°. La pendiente del talud está entre 70°-75°. Se aprecia una fibra de coco colocada en el piso adyacente al talud. Apto para RMR Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización. En general se considera que el geosintético aplicado en el talud y en la explanación no logra los objetivos deseados por diferentes motivos como lo son las pendientes muy elevadas del talud que propician la erosión, inecuado manejo de agua del talud. Los taludes presentan sombra que limitan el desarrollo de la vegetación baja y altos niveles de humedad
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas CRTM05	E	N	
	463503	1209880	
Altura Talud	± 5	m	
Longitud	140	m	
Litología	Turbidita		
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	
	Nivel		
Meteorización	IV-VI		
Humedad	Muy Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	Lado Derecho: Conos talus en la base, surcos erosivos. Lado Izquierdo: Deslizamiento de material y erosión superficial.		
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado/ V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			

35. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-41			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas	E	N	<p>Lado Derecho: El talud se encuentra cubierto con geosintético y malla con fibra de coco. Se aplica hidrosiembra. En la mitad inferior del talud el mismo se encuentra en una pendiente aproximada a los 40° y está más expuesto a la luz solar. El sistema de protección funciona parcialmente. Talud en superficie: Más vertical y el vetiver no funciona.</p> <p>Lado izquierdo del talud: Se aprecia una semiroca con una resistencia a la compresión de 10-15 MPa. Se tiene estratigrafía y agrietamiento. Hay tres grupos de grietas. Se aprecian manchas de oxidación amarillentas y negruzcas en las grietas.</p> <p>Apto RMR</p> <p>Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.</p>
CRTM05	464037	1208334	
Altura Talud	± 12	m	
Longitud	150	m	
Litología	Turbidita		
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	
	Nivel		
Meteorización	V-VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	No son visibles. En la zona no cubierta del talud hay un deslizamiento asociado a un drenaje.		
FOTOGRAFÍA			
			
<p>I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual</p>			


36. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-42			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas	E	N	<p>De 1,0 m a 1,5 m de suelo residual con características limosas. En la zona central del talud se aprecia una zona de 100 m de fuerte hidrotermalismo, con una formación de caolín color blanco-crema, con grietas negruzcas producto de la oxidación. Hacia los flancos se aprecia una colorización rojiza de los sedimentos turbidíticos. En la parte alta del talud hay un deslizamiento.</p> <p>El talud se está lavando. La pendiente inferior es de 40° y la del talud superior es de 65°</p> <p>Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.</p>
CRTM05	464566	1207571	
Altura Talud	± 10	m	
Longitud	300	m	
Litología	Turbidita		
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	Agrietado	IV	
	Nivel		
Meteorización	V-VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	Bastantes cárcavas de erosión y pequeños deslizamientos.		
FOTOGRAFÍA			
			
<p>I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado/ V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual</p>			


37. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-44			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas	E	N	La pendiente del talud se encuentra entre 50°-55°. Posee malla con fibra de coco en el talud y la explanación. La malla se a degradado producto de la pendiente y la sombra, sin resultados satisfactorios.
CRTM05	464608	1207344	
Altura Talud	± 4	m	
Longitud	150	m	
Litología	Turbidita		
	Rumbo	Ángulo	En superficie un suelo residual de 1,5 m de color rojizo. Por debajo de 1,5 m se aprecia una Turbidita intemperizada, color predominantemente rojizo. Se observan manchas de oxidación color amarillento y negros en fisuras y planos de estratificación.
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	
	Nivel		
Meteorización	V-VI		Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	Surcos de erosión y pequeños deslizamientos.		
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado/ V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			

38. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-47			Rasgos geológicos Se observa que el suelo superficial residual tiene aproximadamente 1,0 m de espesor. La pendiente del talud está entre 40°-50°. Por debajo de la capa de suelo superficial se aprecia una turbidita. El sistema de hidrosiembra utilizado es poco efectivo debido a la alta pendiente del talud. Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas CRTM05	E	N	
	464915	1207030	
Altura Talud	± 6	m	
Longitud	150	m	
Litología	Turbidita		
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento			
	Nivel		
Meteorización	V-VI		
Humedad	Muy Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	Cárcavas de erosión		
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			


39. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-48			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas CRTM05	E	N	Espesor de suelo residual muy pequeño de color rojizo. El talud posee hidrosiembra.
	465088	1206933	
Altura Talud	± 5,5	m	En la base: Semiroca agrietada, contituida generalmente por arenisca. Aparecen grietas de descompresión y otras de origen tectónico que alcanzan los 2,0 m de longitud.El relleno de las grietas es generalmente de caolín, posiblemente por hidrotermalismo.Se observan manchas de oxidación en las grietas.
Longitud	250	m	
Litología	Turbidita		Apto RMR
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
	Nivel	Familias	
Fracturamiento		IV-V	
	Nivel		
Meteorización	IV-VI		
Humedad	Muy Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	Cárcavas de erosión y pequeños deslizamientos de material.		
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado/ V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			

40. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-49			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas	E	N	<p>Aproximadamente 1,0 m de suelo.</p> <p>Se observan unos 2,0 m de una turbidita con horizontes en serie bien definidas de 0,6 m a 0,7 m.</p> <p>En la base: se aprecia una turbidita más compacta con laminación centimétrica y decimétrica.</p> <p>Se aprecia un deslizamiento en la capa superior de turbidita. Pendiente del talud unos 70°-80°.</p> <p>No posee medidas de protección con geosintéticos</p> <p>Apto RMR</p> <p>Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.</p>
CRTM05	465311	1206867	
Altura Talud	± 6	m	
Longitud	80	m	
Litología	Turbidita		
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	
	Nivel		
Meteorización	V-VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	Cárcavas de erosión y pequeños deslizamientos.		
FOTOGRAFÍA			
			
<p>I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual</p>			

41. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-50			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas	E	N	Espesor de suelo residual de 1,0 m como máximo. Turbidita con apariencia de semiroca. Se observa estratificación que llega a ser centimétrica y decimétrica.
CRTM05	465508	1206828	
Altura Talud	± 5	m	
Longitud	250	m	
Litología	Turbidita		Los planos de estratificación poseen diferente buzamiento en el sentido del talud. Se observa agrietamiento con al menos IV familias de grietas.
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	IV	La hidrosiembra no es efectiva debido al talud es muy vertical. Pendiente máxima es entre 55°-60°
	Nivel		
Meteorización	IV-VI		
Humedad	Muy Húmedo		
	SÍ	NO	Aplicar RMR
Fallas visibles		X	Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	Cárcavas de erosión y pequeños desprendimientos de material. Algunos en favor de los planos de erosión.		
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			

42. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-51			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas CRTM05	E	N	Espesor de suelo residual hasta 1,5 m, color rojizo y características limosas.
	465825	1206935	
Altura Talud	± 6	m	Le subyace una turbidita alterada. Fracturamiento por descompresión. Turbidita con estratificación subhorizontal.
Longitud	200	m	
Litología	Turbidita		En profundidad la turbidita parece menos alterada (semiroca). Resistencia a la compresión de 2-5MPa
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	Se aplica hidrosiembra
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	---	Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
	Nivel		
Meteorización	V-VI		Se aplica hidrosiembra
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
Rasgos erosivos y otras observaciones	Cárcavas de erosión y varios desprendimientos de masa. El mayor es de 10,0 m de longitud.		
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			

43. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-52			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas	E	N	Espesor de suelo residual hasta 0,5 m.
CRTM05	465957	1206987	
Altura Talud	±3	m	Le subyace una turbidita fina de colores rojizos producto de la oxidación.
Longitud	50	m	
Litología	Turbidita		Se puede apreciar laminación y fracturamiento por descompresión y alteración.
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	Apto RMR
	Nivel	Familias	
Fracturamiento	---	Varias	Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
	Nivel		
Meteorización	V-VI		
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	
Rasgos erosivos y otras observaciones	Cárcavas de erosión muy leves.		
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			

44. Ficha de Descripción Rápida de Taludes			
TALUD T-54			Rasgos geológicos
Proyecto	Ruta Nacional No. 856		
Coordenadas	E	N	Espesor de suelo residual hasta 1,0 m; de composición limosa y color rojizo.
CRTM05	466411	1207010	
Altura Talud	± 4	m	Por debajo del espesor de suelo, se encuentra una turbidita muy alterada.
Longitud	80	m	
Litología	Turbidita		Se puede apreciar laminación muy fina, tanto centimétrica como decimétrica y manchas de oxidación color negras y rojizas.
	Rumbo	Ángulo	
Buzamiento	---	---	El color predominante del talud es rojizo a gris verdoso.
	Nivel	Familias	
Fracturamiento			Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
	Nivel		
Meteorización	V-VI		El color predominante del talud es rojizo a gris verdoso.
Humedad	Húmedo		
	SÍ	NO	Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
Fallas visibles		X	
Apto geofísica?		X	Alteraciones : Oxidación - lixiviación y arcillitización.
Rasgos erosivos y otras observaciones	Cárcavas de erosión. Conus de talus y desprendimiento de masa en el centro del talud.		
FOTOGRAFÍA			
			
I: sano / II: ligeramente meteorizado / III: moderadamente meteorizado / IV: fuertemente meteorizado / V: completamente meteorizado / VI: Suelo residual			

APÉNDICE 3. Resultados de las perforaciones SPT

- Sitios Talud T-8a

REGISTRO DE PERFORACIÓN										
EXPLORACIÓN EN TALUD T-8a.										
LOCALIZACIÓN:		Pocosol, San Carlos, Alajuela Sección 2.			INICIO:		15/06/2014		COORDENADAS	
PERFORACIÓN :		Lado derecho No. 1			FINALIZACIÓN:		15/06/2014		CRTM05:	
					PROF. TOTAL:		10,00 m		ALTURA:	
									71,16 m	
PROF. (m)	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	NIVEL FREÁTICO	DIÁMETRO	MUESTRAS				GRADO DE ALTERACIÓN	OBSERVACIONES
					PROF. (m)	REC. (%)	RQD %	SPT (N)		
1		CAPA 1 Limo de alta plasticidad. Color rojizo y café con origen eluvial - deluvial. Consistencia variable de media a firme. Clasifica según el SUCS como MH.	SPT		0,00-0,50	70%		6	VI	Nivel freático: Presencia de afloramientos de agua
0,50-1,00					62%		12			
1,00-1,50					52%		9			
1,50-2,00					64%		12			
2		CAPA 2 Arenisca fina con fuerte influencia volcánica muy estratificada. Se comporta como limo de alta plasticidad. Color amarillento y rojizo. Consistencia de firme a muy firme. Clasifica según el SUCS como MH.			2,00-2,50	52%		12	V-VI	
2,50-3,00					52%		21			
3,00-3,50					48%		18			
3,50-4,00					46%		16			
3		CAPA 3 Arenisca fina con fuerte influencia volcánica muy estratificada. Se comporta como limo de baja plasticidad. Color amarillento, beige y rojizo. Consistencia de muy firme. Clasificación tacto visual como ML.			4,00-4,50	40%		14	IV-V	
4,50-5,00					52%		18			
5,00-5,50					50%		25			
5,50-6,00					46%		12			
4		CAPA 4 Arenisca fina con fuerte influencia volcánica muy estratificada. Se comporta como limo de baja plasticidad. Color de amarillento a crema. Consistencia de muy firme a dura.			6,00-6,50	50%		17	III-IV	
6,50-7,00					42%		18			
7,00-7,50					52%		28			
7,50-8,00					54%		28			
5					8,00-8,50	20%		33		
8,50-9,00					46%		36			
9,00-9,50					42%		25			
9,50-10,00					52%		37			
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										

REGISTRO DE PERFORACIÓN													
EXPLORACIÓN EN TALUD T-8a.													
LOCALIZACIÓN:		Pocosol, San Carlos, Alajuela Sección 2.			INICIO:		15/06/2014		COORDENADAS				
					FINALIZACIÓN:		15/06/2014		CRTM05:				
PERFORACIÓN :		Lado derecho No. 2			PROF. TOTAL:		7,50 m		ALTURA:				
									56,13 m				
PROF. (m)	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	NIVEL FREÁTICO	DIÁMETRO	MUESTRAS				GRADO DE ALTERACIÓN	OBSERVACIONES			
					PROF. (m)	REC. (%)	RQD %	SPT (N)					
1		CAPA 2 Arenisca fina con fuerte influencia volcánica muy estratificada. Se comporta como limo de alta plasticidad. Color amarillento y rojizo. Consistencia de firme a muy firme. Clasifica según el SUCS como MH.		SPT	0,00-0,50	72%		8	V-VI	Nivel freático: Presencia de afloramientos de agua			
					0,50-1,00	60%		17					
2					1,00-1,50	40%		6					
					1,50-2,00	50%		12					
3					2,00-2,50	44%		15					
					2,50-3,00	50%		19					
4		CAPA 3 Arenisca fina con fuerte influencia volcánica muy estratificada. Se comporta como limo de baja plasticidad. Color amarillento, beige y rojizo. Consistencia de muy firme. Clasificación tacto visual como ML.			3,00-3,50	58%		20	IV-V				
					3,50-4,00	32%		16					
5					4,00-4,50	48%		16					
					4,50-5,00	40%		13					
6					5,00-5,50	36%		28					
					5,50-6,00	36%		12					
7		CAPA 4 Arenisca fina con fuerte influencia volcánica muy estratificada. Se comporta como limo de baja plasticidad. Color de amarillento a crema. Consistencia de muy firme a dura.			6,00-6,50	34%		15			III-IV		
					6,50-7,00	38%		16					
8					7,00-7,50	42%		25					
9													

• Sitios Talud T-40

REGISTRO DE PERFORACIÓN										
EXPLORACIÓN EN TALUD T-40.										
LOCALIZACIÓN:		Pocosol, San Carlos, Alajuela Sección 2.			INICIO:		1/08/2014		COORDENADAS	
					FINALIZACIÓN:		1/08/2014		CRTM05:	
PERFORACIÓN :		Lado Derecho. Sitio 1			PROF. TOTAL:		3,00 m		ALTURA:	
									30,60 m	
PROF. (m)	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	NIVEL FREÁTICO	DIÁMETRO	MUESTRAS				GRADO DE ALTERACIÓN	OBSERVACIONES
					PROF. (m)	REC. (%)	RQD %	SPT (N)		
1		CAPA 1: Deluvio. Limo de alta plasticidad. Color rojo con zonas amarillentas y café. Consistencia blanda. Clasificación tacto-visual como MH.		SPT	0,00-0,50	40%		2	VI	Nivel freático: No hay
		CAPA 2 Arenisca fina muy estratificada. Se comporta como limo de baja plasticidad. Color crema amarillento con manchas de oxidación. Consistencia de blanda a media. Clasifica según el SUCS como ML.			0,50-1,00	66%		3	V-VI	
2					1,00-1,50	36%		6		
					1,50-2,00	48%		5		
3					CAPA 4: Arenisca estratificada. Se comporta como limo de baja plasticidad. Color amarillento con manchas de oxidación. Consistencia dura. Clasifica según el SUCS como ML.	2,00-2,50	50%			
					2,50-3,00	72%		50		

REGISTRO DE PERFORACIÓN											
EXPLORACIÓN EN TALUD T-40											
LOCALIZACIÓN:		Pocosol, San Carlos, Alajuela Sección 2.		INICIO:		02/08/2014		COORDENADAS		E 463849	
				FINALIZACIÓN:		02/08/2014		CRTM05:		N 1208462	
PERFORACIÓN :		Lado Derecho. Sitio 2		PROF. TOTAL:		9,50 m		ALTURA:		38,65 m	
PROF. (m)	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	NIVEL FREÁTICO	DIÁMETRO	MUESTRAS				GRADO DE ALTERACIÓN	OBSERVACIONES	
					PROF. (m)	REC. (%)	RQD %	SPT (N)			
1		CAPA 2 Turbidita estratificada con abundante contenido de pómez. Se comporta como limo de baja plasticidad. Color rojizo con manchas negruzcas. Consistencia variable de blanda a firme. Clasifica según el SUCS como ML.		SPT	0,00-0,50	30%		2	VI	Nivel freático: No hay	
					0,50-1,00	40%		3	V-VI		
2					1,00-1,50	42%		5			
3					1,50-2,00	48%		4			
4					2,00-2,50	44%		6			
5					2,50-3,00	42%		10			
6					3,00-3,50	20%		7			
7					3,50-4,00	38%		8			
8					4,00-4,50	40%		12			
9					4,50-5,00	42%		13			
10		CAPA 3 Turbidita con menor grado de alteración. Se comporta como limo de baja plasticidad. Color rojizo con manchas negruzcas. Consistencia muy firme. Clasifica según el SUCS como ML.		SPT	5,00-5,50	28%		22	IV-V		
6					5,50-6,00	38%		19			
7					6,00-6,50	40%		22			
8					6,50-7,00	30%		16			
9					7,00-7,50	38%		23			
11		CAPA 4 Pómez blanco. Se comporta como limo de baja plasticidad. Color blanco cremoso con manchas de oxidación. Consistencia dura.		SPT	7,50-8,00	32%		26	III-IV		
					8,00-8,50	40%		60			
					8,50-9,00	46%		53			
					9,00-9,50	40%		50			

REGISTRO DE PERFORACIÓN


EXPLORACIÓN EN TALUD T-40

LOCALIZACIÓN:	Pocosol, San Carlos, Alajuela Sección 2.	INICIO:	6/09/2014	COORDENADAS	E 463855
		FINALIZACIÓN:	6/09/2014	CRTM05:	N 1208445
PERFORACIÓN :	Lado Derecho . Sitio 3	PROF. TOTAL:	16,00 m	ALTURA:	44,28 m

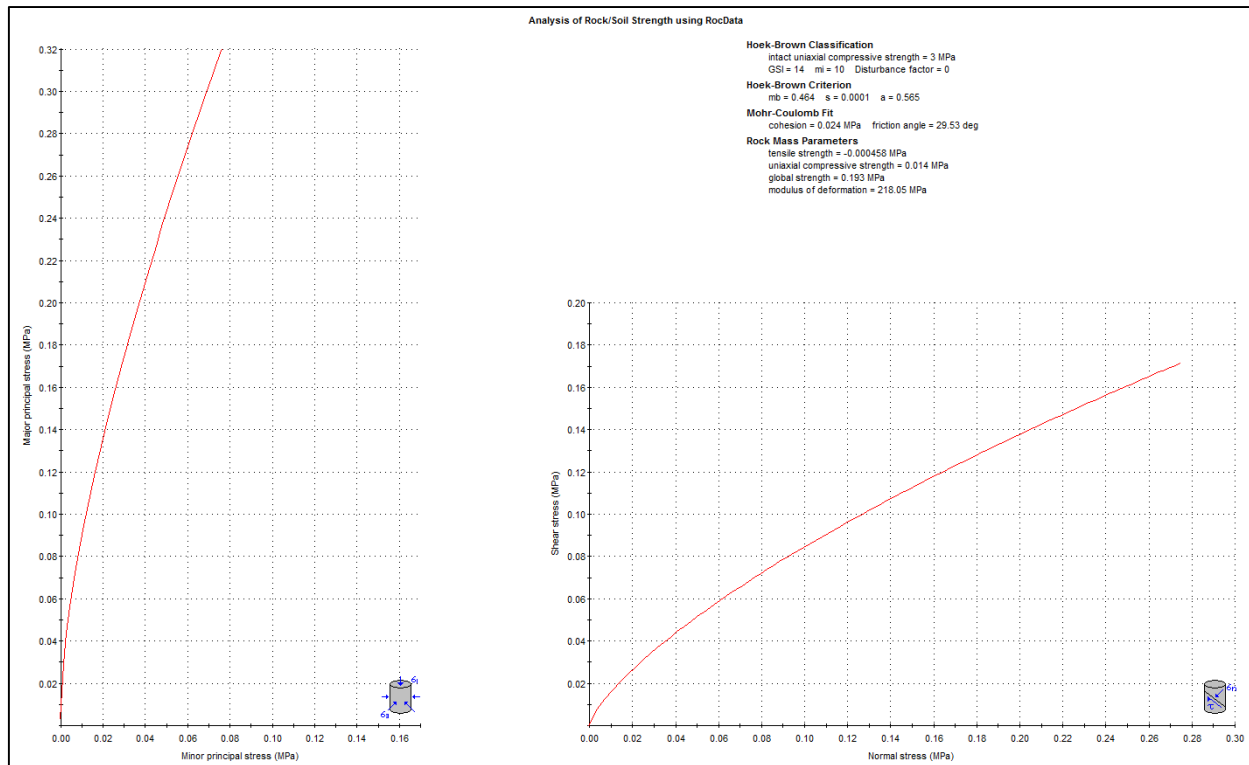
PROF. (m)	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	NIVEL FREÁTICO	DIÁMETRO	MUESTRAS				GRADO DE ALTERACIÓN	OBSERVACIONES
					PROF. (m)	REC. (%)	RQD %	SPT (N)		
1		CAPA 1: Limo de alta plasticidad. Color rojizo con zonas cafés. Origen eluvial - deluvial. Consistencia blanda. Clasificación tacto-visual como MH.		SPT	0,00-0,50	56%		2	VI	Nivel freático: No hay
0,50-1,00					42%		5			
1,00-1,50					60%		9			
1,50-2,00					46%		10			
2,00-2,50	52%		12							
2,50-3,00	54%		10							
3,00-3,50	40%		7							
3,50-4,00	34%		7							
4		CAPA 2 Turbidita estratificada con abundante contenido de pómez. Se comporta como limo de baja plasticidad. Color rojizo con manchas negruzcas. Consistencia variable de blanda a firme. Clasifica según el SUCS como ML.		SPT	4,00-4,50	24%		7	V-VI	
4,50-5,00					40%		6			
5,00-5,50					44%		7			
5,50-6,00					38%		6			
6,00-6,50					30%		7			
6,50-7,00					36%		9			
7,00-7,50					40%		9			
7,50-8,00					30%		12			
8		CAPA 3 Turbidita con menor grado de alteración. Se comporta como limo de baja plasticidad. Color rojizo con manchas negruzcas. Consistencia muy firme. Clasifica según el SUCS como ML.		SPT	8,00-8,50	40%		16	IV-V	
8,50-9,00					34%		10			
9,00-9,50					40%		13			
9,50-10,00					46%		16			
10,00-10,50					40%		19			
10,50-11,00					40%		17			
11,00-11,50					40%		14			
11,50-12,00					50%		10			
9		CAPA 4 Pómez blanco. Se comporta como limo de baja plasticidad. Color blanco cremoso con manchas de oxidación. Consistencia dura.		SPT	12,00-12,50	54%		15	III-IV	
12,50-13,00					54%		16			
13,00-13,50					40%		17			
13,50-14,00					36%		19			
14,00-14,50					50%		23			
14,50-15,00					40%		26			
15,00-15,50					44%		43			
15,50-16,00					52%		50			
10				SPT						
11				SPT						
12				SPT						
13				SPT						
14				SPT						
15				SPT						
16				SPT						
17				SPT						
18				SPT						
19				SPT						

• Sitios Talud T-56

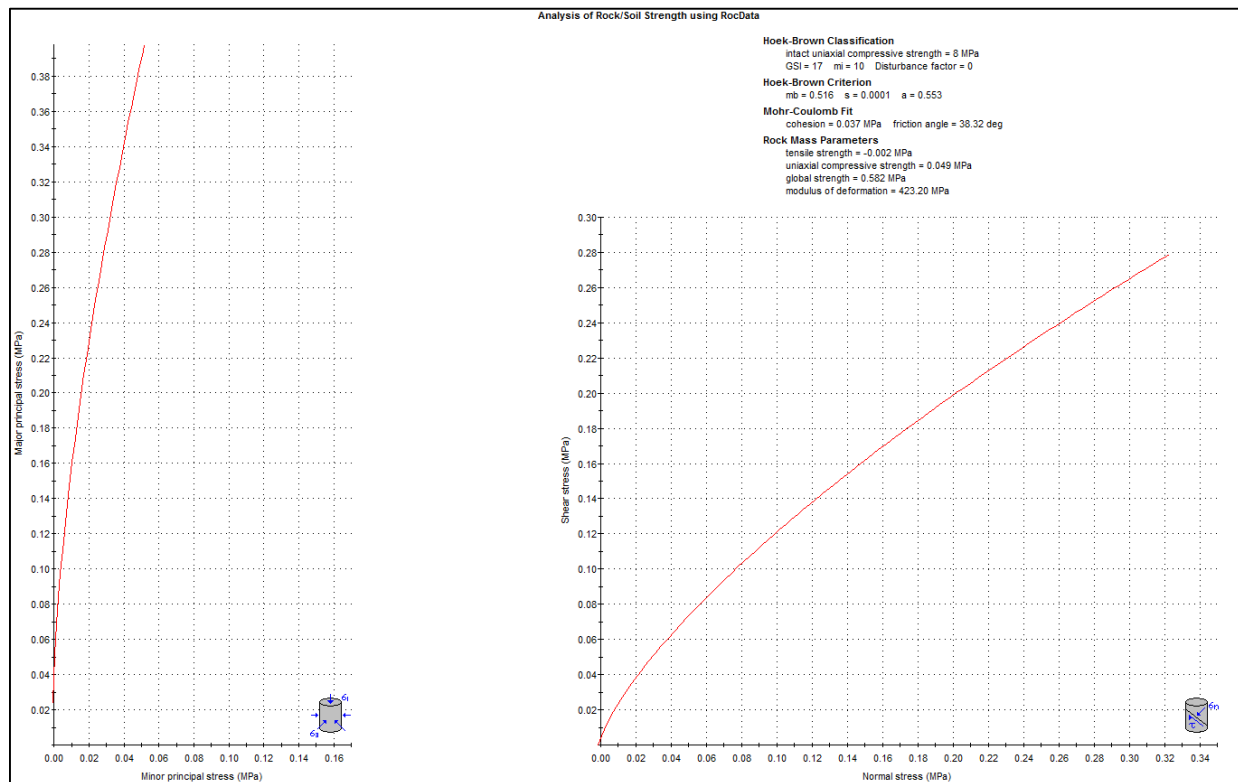
REGISTRO DE PERFORACIÓN													
EXPLORACIÓN EN TALUD T-56.													
LOCALIZACIÓN:		Pocosol, San Carlos, Alajuela Sección 2.		INICIO:		21/08/2014		COORDENADAS CRTM05:		E 466524 N 1206920			
PERFORACIÓN :		Lado izquierdo Sitio 1.		PROF. TOTAL:		13,00 m		ALTURA:		46,55 m			
PROF. (m)	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	NIVEL FREÁTICO	DIÁMETRO	MUESTRAS				GRADO DE ALTERACIÓN	OBSERVACIONES			
					PROF. (m)	REC. (%)	RQD %	SPT (N)					
1		CAPA 1 Deluvio. Limo de alta plasticidad. Color rojizo. Consistencia variable de muy firme a media. Clasificación tacto-visual como MH.		SPT	0,00-0,50	40%		6	VI	Nivel freático: No hay			
2					0,50-1,00	36%		13					
3					1,00-1,50	40%		19					
4					1,50-2,00	38%		14					
5					2,00-2,50	40%		18					
6					2,50-3,00	44%		20					
7		CAPA 2 Turbidita heterogenea. Se comporta como limo de alta plasticidad. Color café rojizo. Consistencia de media a muy firme. Clasifica según el SUCS como MH.			3,00-3,50	32%		20	V-VI				
8					3,50-4,00	16%		10					
9					4,00-4,50	26%		9					
10					4,50-5,00	22%		11					
11					5,00-5,50	40%		7					
12					5,50-6,00	34%		13					
13					6,00-6,50	30%		14					
14					6,50-7,00	32%		8					
15					7,00-7,50	34%		12					
16					7,50-8,00	46%		9					
17					8,00-8,50	40%		7					
18					8,50-9,00	40%		11					
19		CAPA 3: Turbidita heterogenea con menor grado de alteración. Color rojizo a café. Consistencia muy firme.			9,00-9,50	34%		19	IV-V				
20					9,50-10,00	40%		11					
21					10,00-10,50	50%		12					
22					10,50-11,00	40%		13					
23					11,00-11,50	40%		10					
24					11,50-12,00	42%		9					
25					12,00-12,50	44%		9					
26					12,50-13,00	50%		18					

REGISTRO DE PERFORACIÓN											
EXPLORACIÓN EN TALUD T-56.											
LOCALIZACIÓN:		Pocosol, San Carlos, Alajuela Sección 2.			INICIO:		21/08/2014		COORDENADAS		E 466530
					FINALIZACIÓN:		21/08/2014		CRTM05:		N 1206909
PERFORACIÓN :		Lado izquierdo Sitio 2			PROF. TOTAL:		9,00 m		ALTURA:		41.10 m
PROF. (m)	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	NIVEL FREÁTICO	DIÁMETRO	MUESTRAS				GRADO DE ALTERACIÓN	OBSERVACIONES	
					PROF. (m)	REC. (%)	RQD %	SPT (N)			
1		CAPA 2 Turbidita heterogenea. Se comporta como limo de alta plasticidad. Color café rojizo. Consistencia de media a muy firme. Clasifica según el SUCS como MH.		SPT	0,00-0,50	36%		5	V-VI	Nivel freático: No hay	
2					0,50-1,00	44%		11			
3					1,00-1,50	38%		18			
4					1,50-2,00	46%		13			
5					2,00-2,50	40%		19			
6					2,50-3,00	42%		22			
7					3,00-3,50	36%		22			
8					3,50-4,00	18%		11			
9					4,00-4,50	22%		9			
10					4,50-5,00	20%		13			
11		CAPA 3: Turbidita heterogenea con menor grado de alteración. Color rojizo a café. Consistencia muy firme.		SPT	5,00-5,50	38%		8	IV-V		
12					5,50-6,00	32%		14			
13					6,00-6,50	28%		15			
14					6,50-7,00	34%		10			
15					7,00-7,50	36%		13			
16				SPT	7,50-8,00	44%		7	IV-V		
17					8,00-8,50	36%		7			
18					8,50-9,00	36%		13			

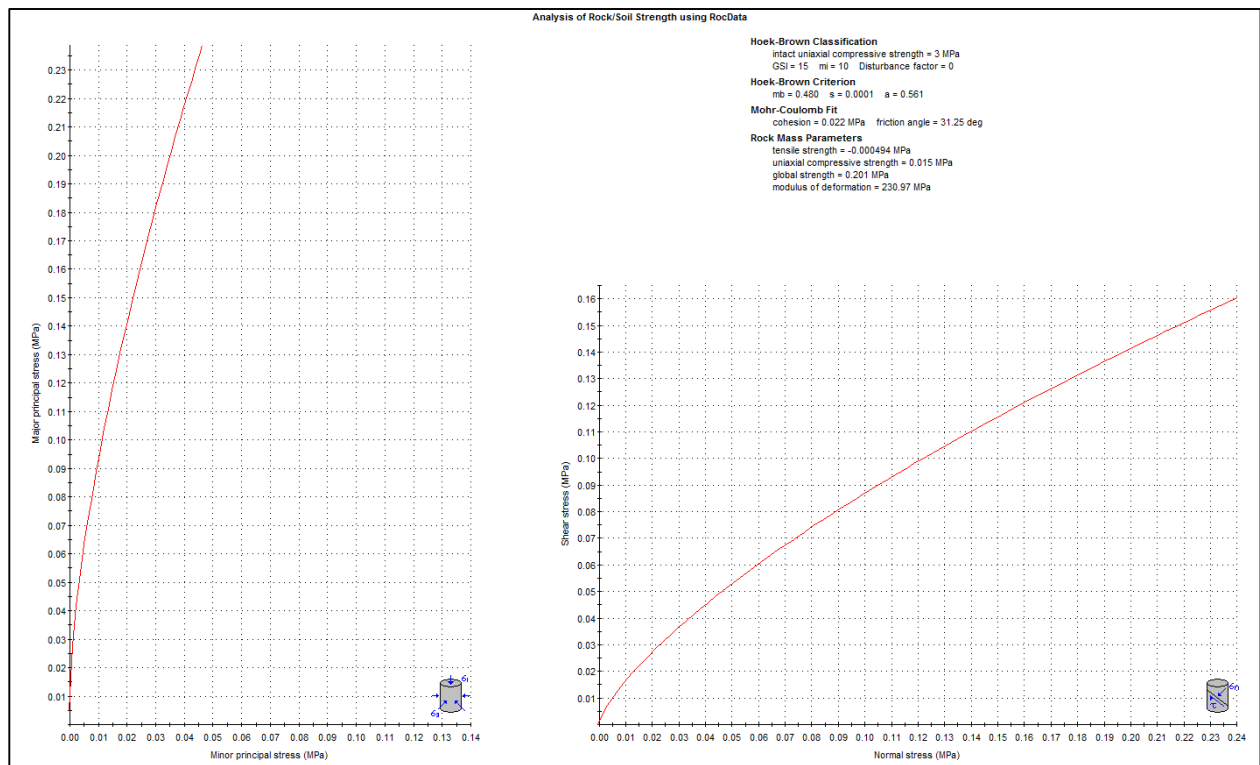
APÉNDICE 4. Ficheros de Salida del programa RocData 3.0®



Análisis con RocData 3.0®, Talud T-8a

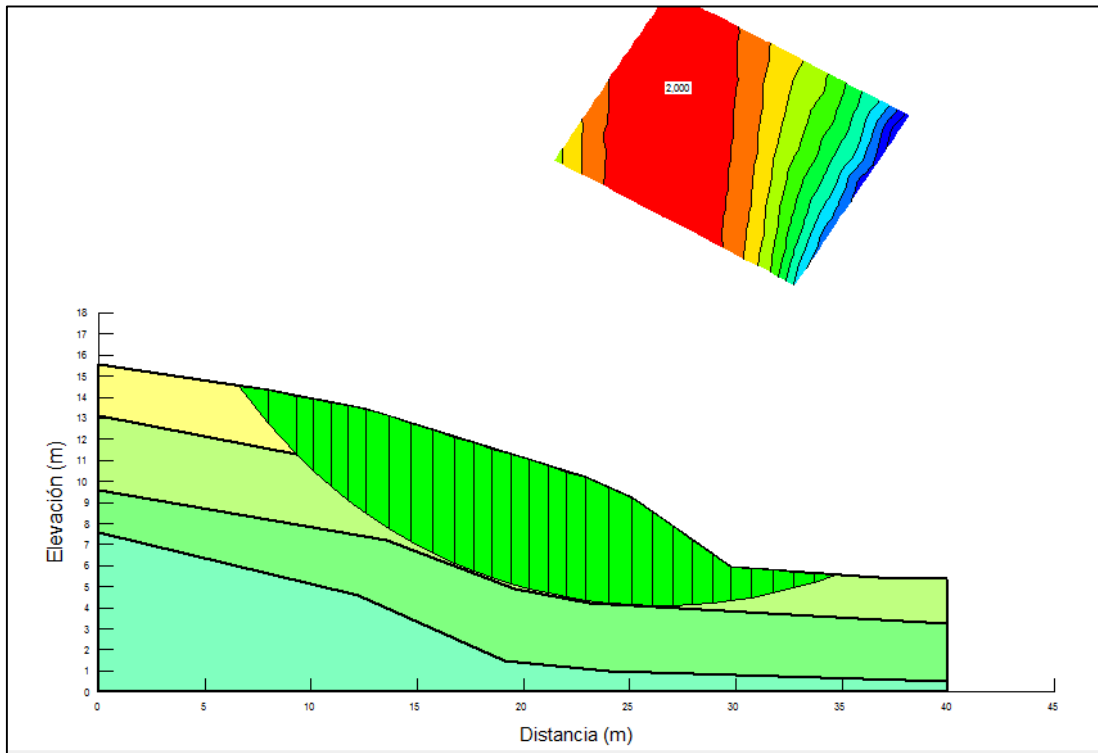


Análisis con RocData 3.0®, talud T-40

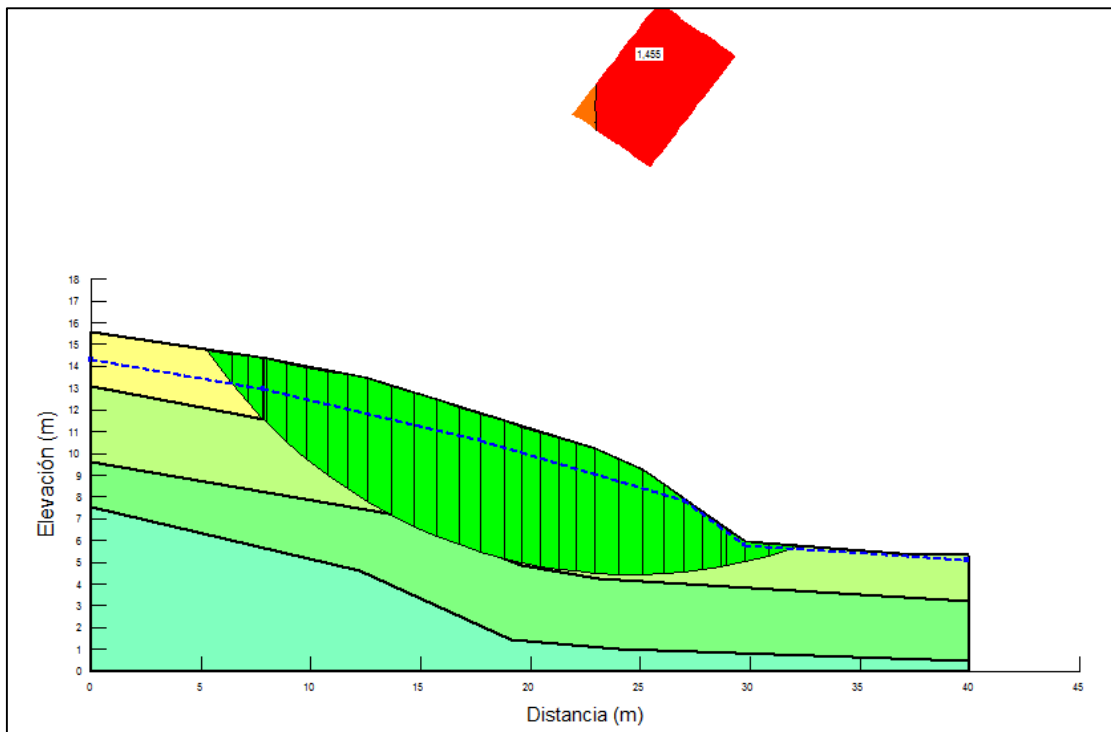


Análisis con RocData 3.0®, talud T-56

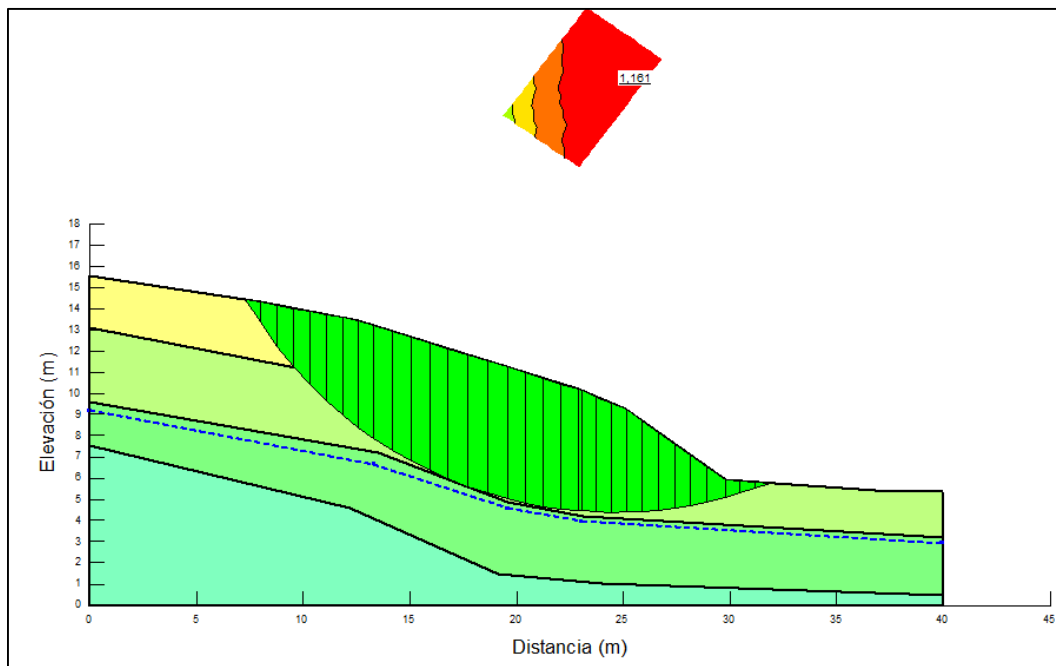
APÉNDICE 5. Ficheros de salida SLOPE/W®, para las laderas y los cortes.



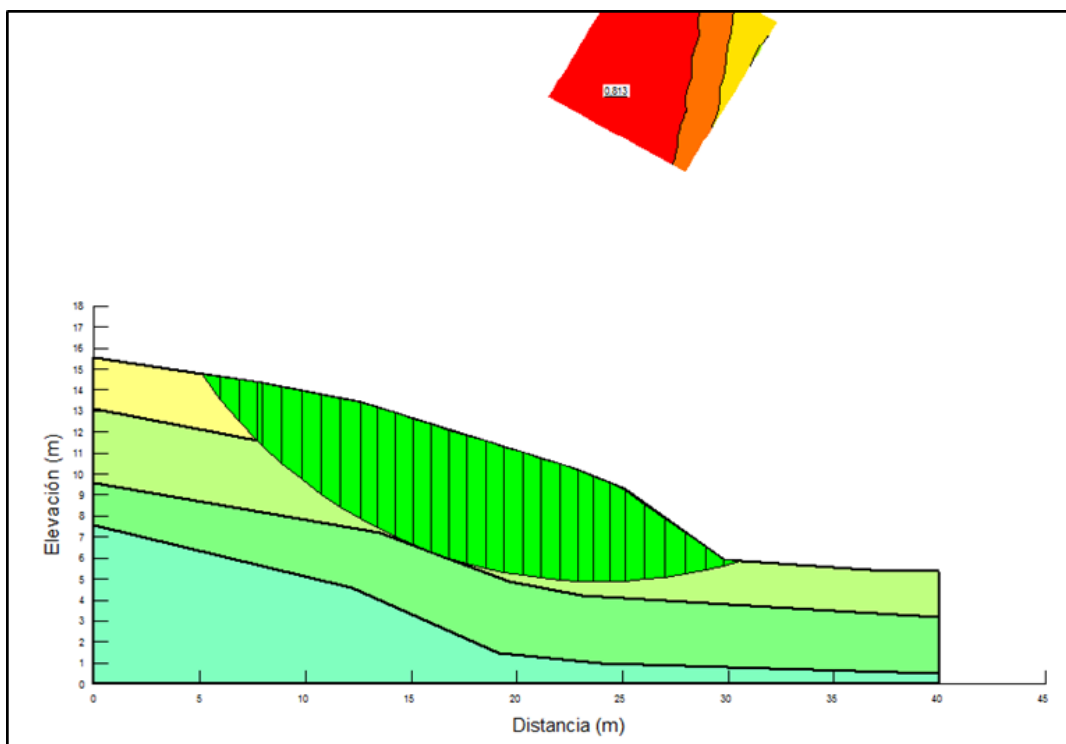
Análisis de la ladera natural del talud T-8a en condición estática sin NF



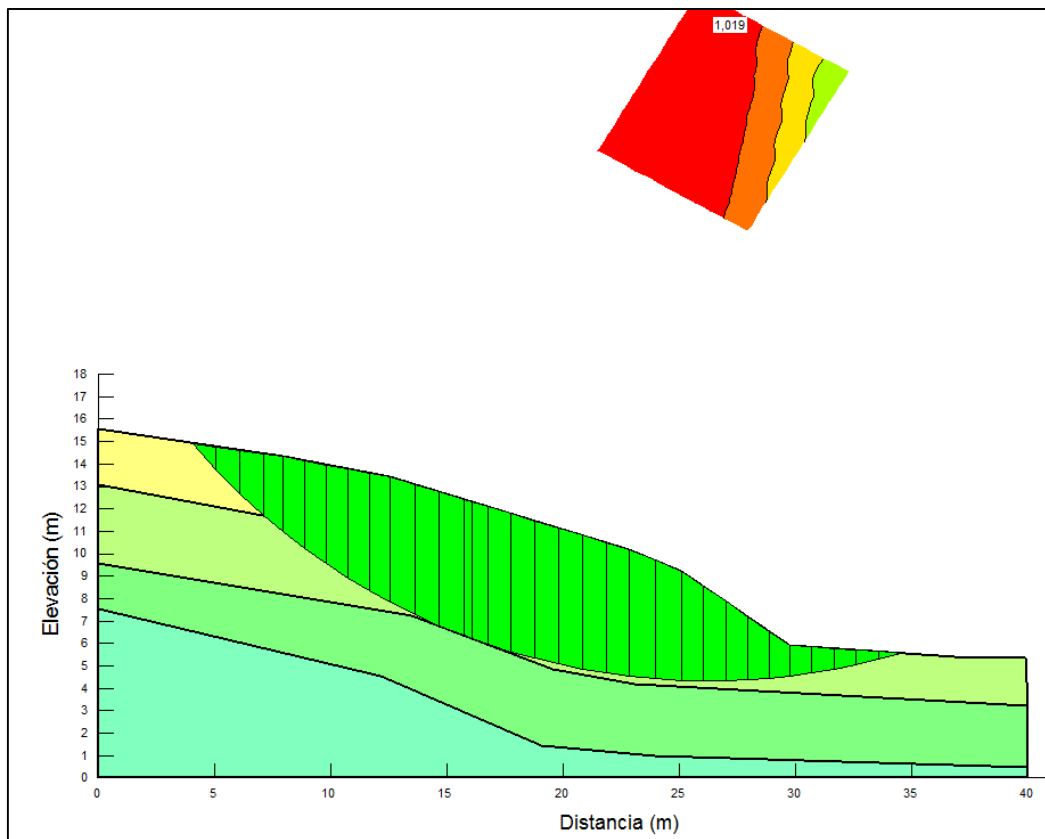
Análisis de la ladera natural del talud T-8a en condición estática con NF



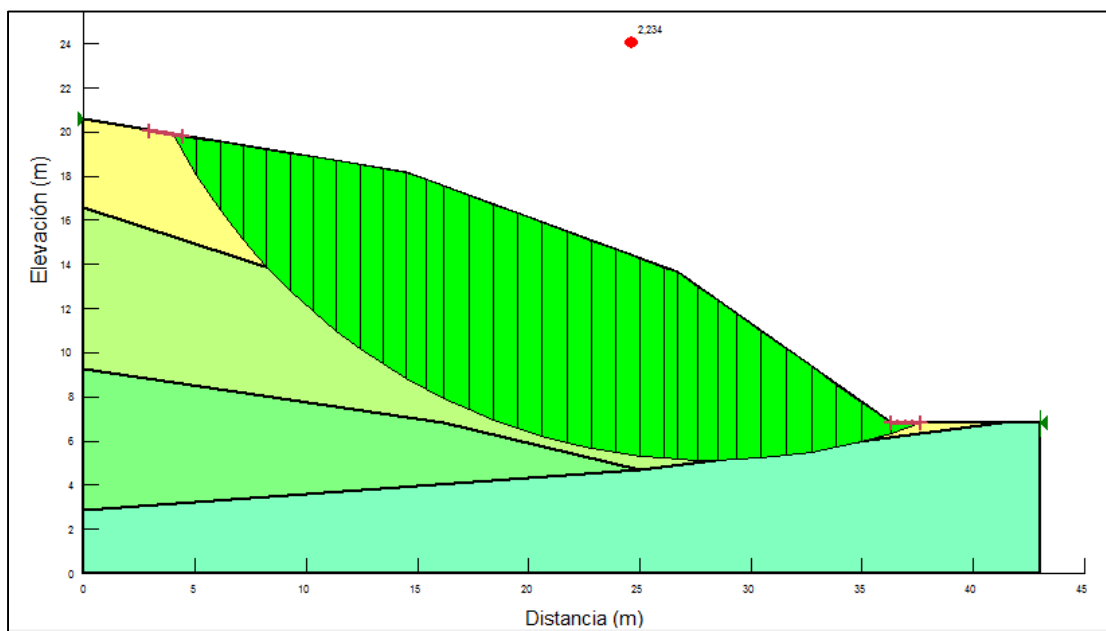
Análisis de la ladera natural del talud T-8a en condición frente húmedo



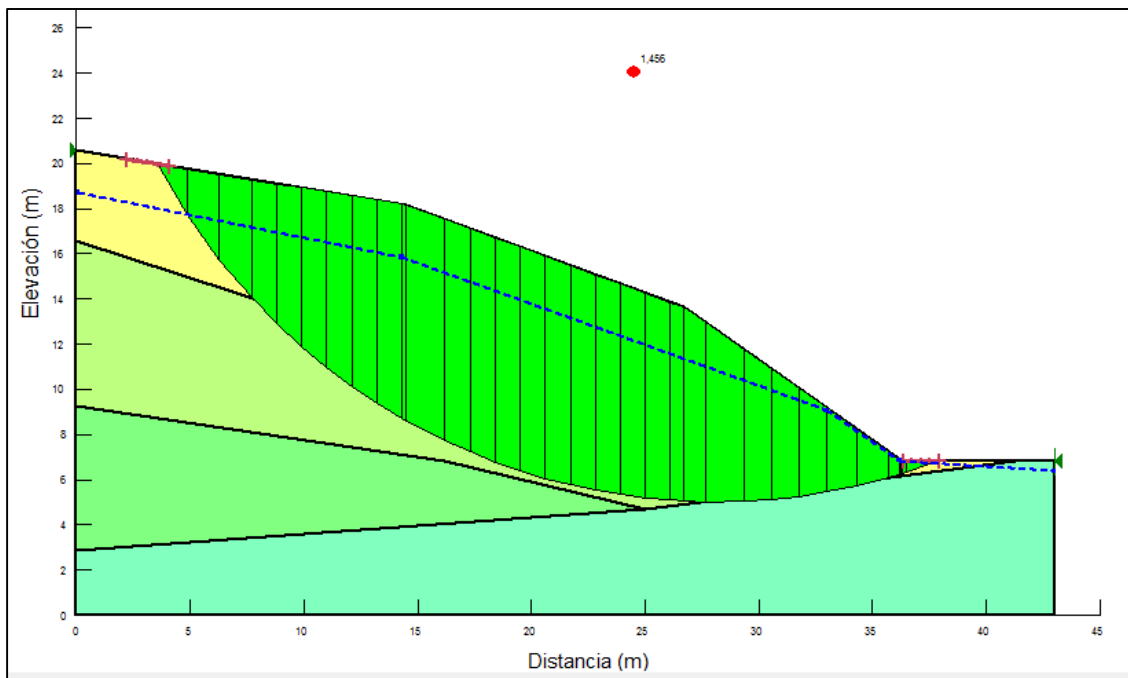
Análisis de la ladera natural del talud T-8a en condición pseudoestática con frente húmedo



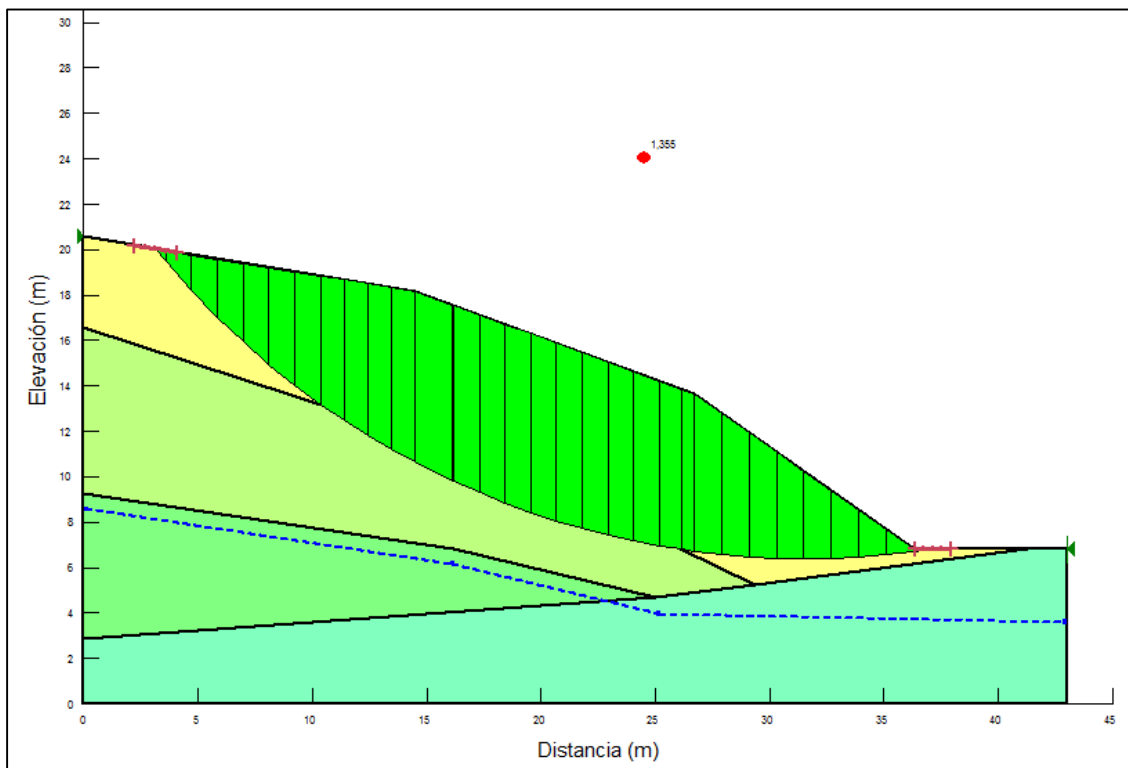
Análisis de la ladera natural del talud T-8a en condición pseudoestática con parámetros UU



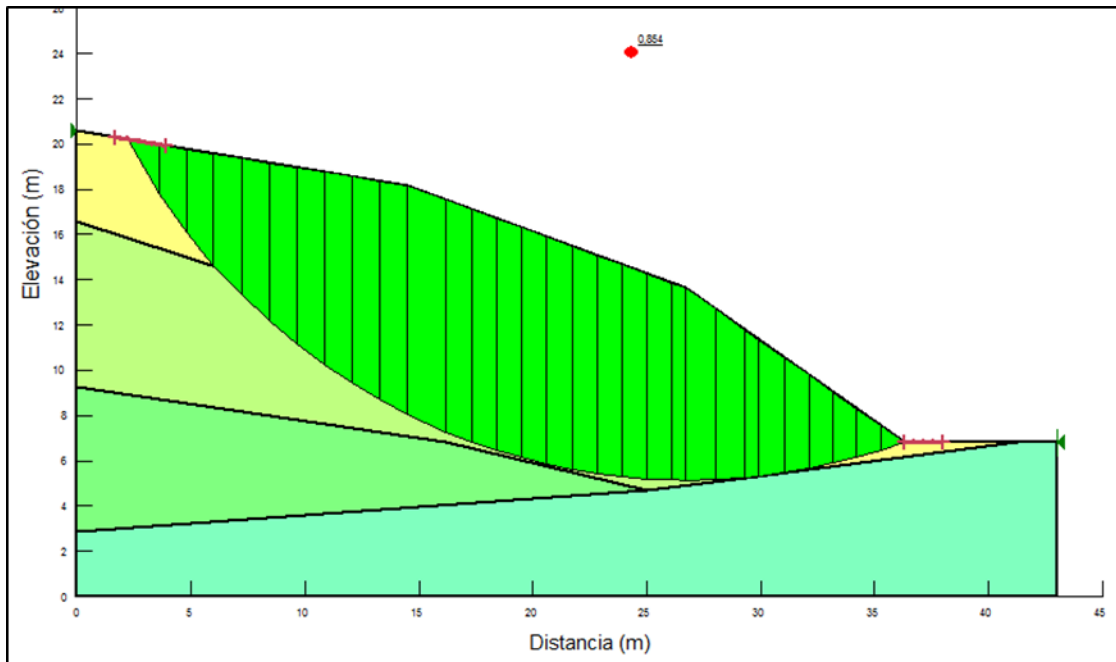
Análisis de la ladera natural del talud T-40 en condición estática sin NF



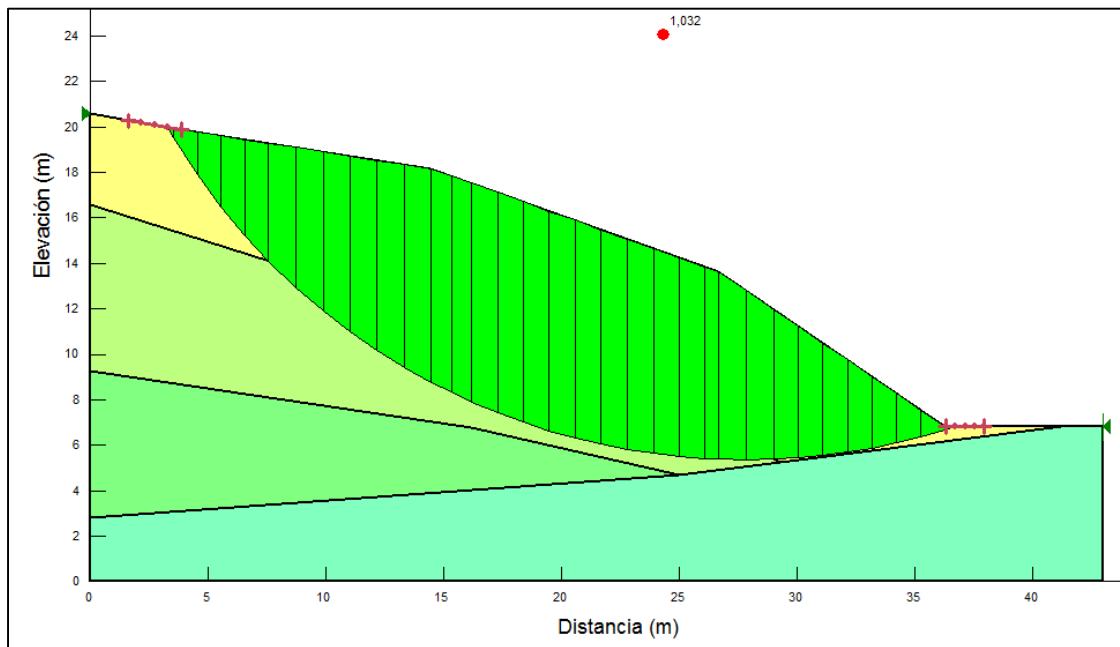
Análisis de la ladera natural del talud T-40 en condición estática con NF



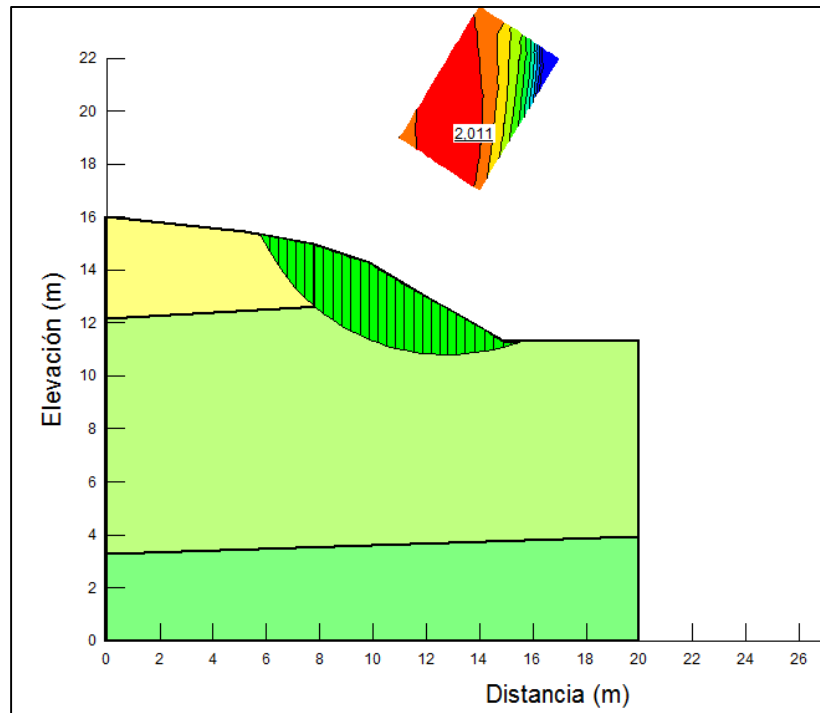
Análisis de la ladera natural del talud T-40 en condición frente húmedo



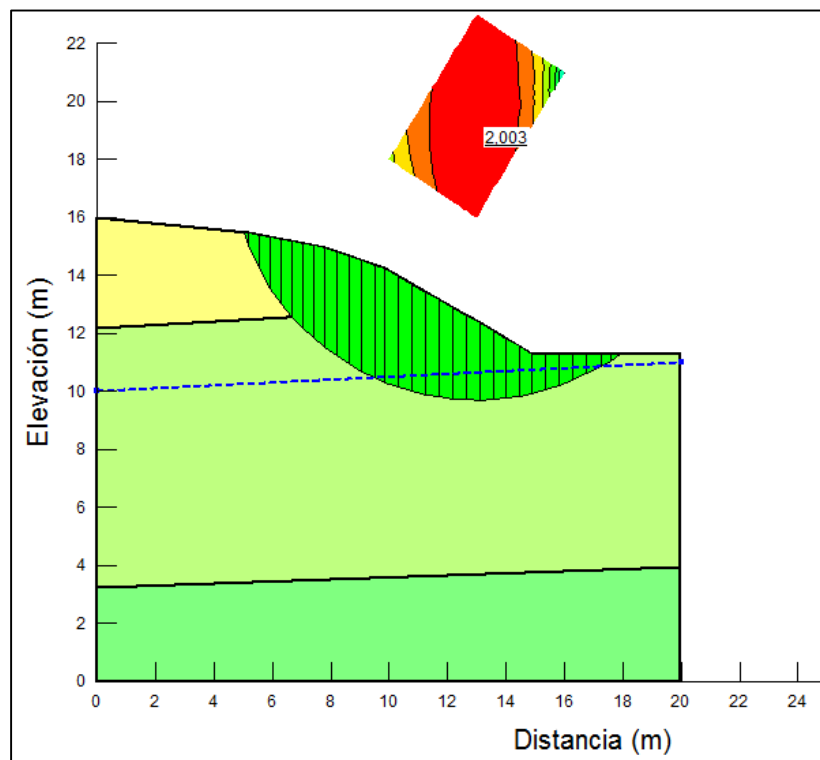
Análisis de la ladera natural del talud T-40 en condición pseudoestática con frente húmedo



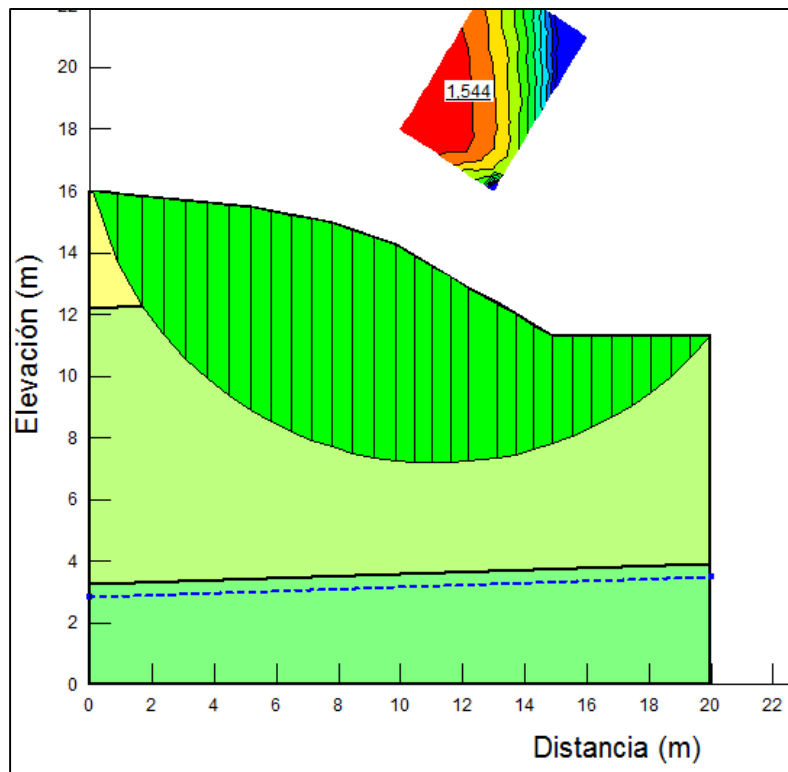
Análisis de la ladera natural del talud T-40 en condición pseudoestática con parámetros UU



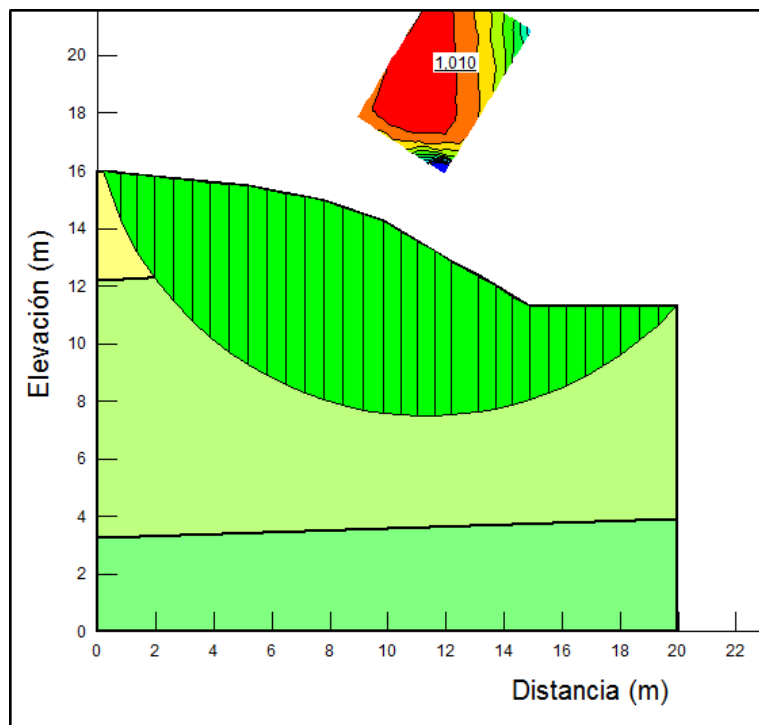
Análisis de la ladera natural del talud T-56 en condición estática sin NF



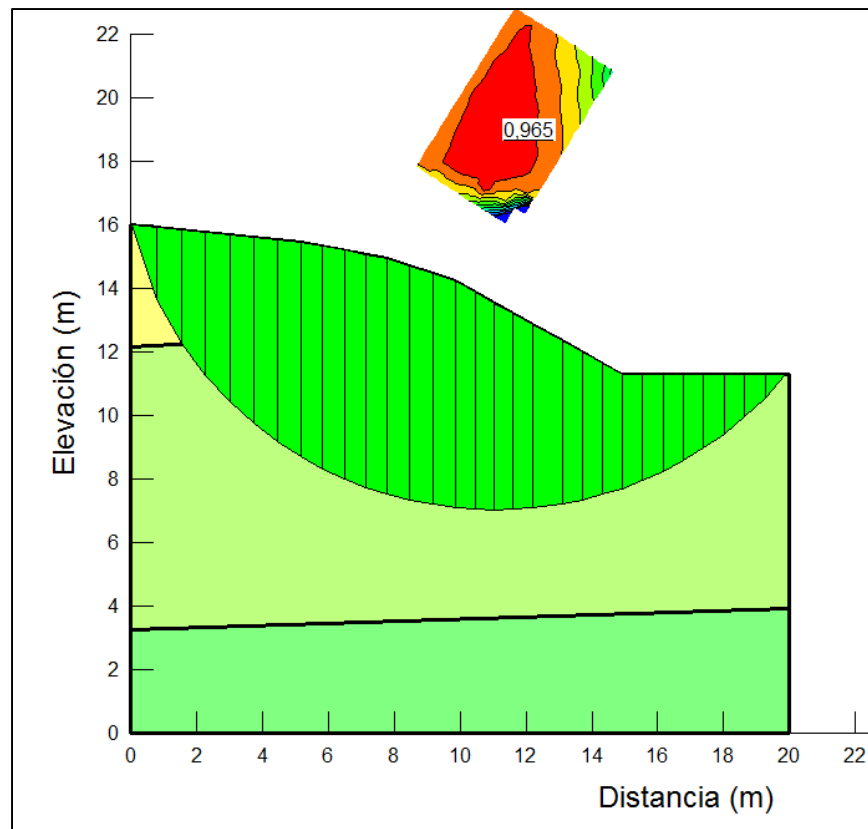
Análisis de la ladera natural del talud T-56 en condición estática con NF



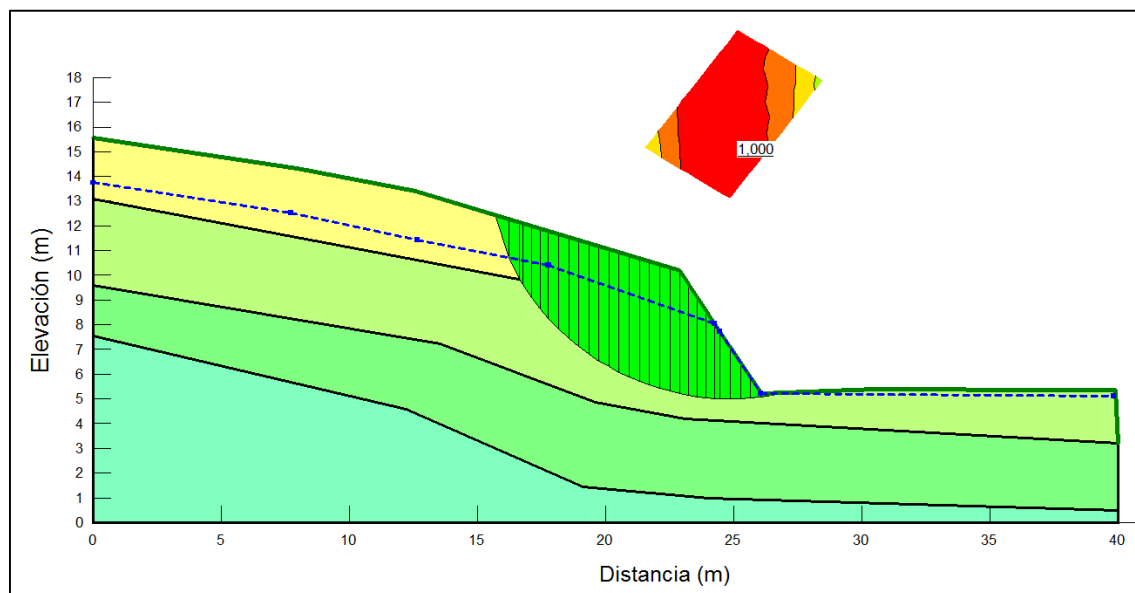
Análisis de la ladera natural del talud T-56 en condición frente húmedo



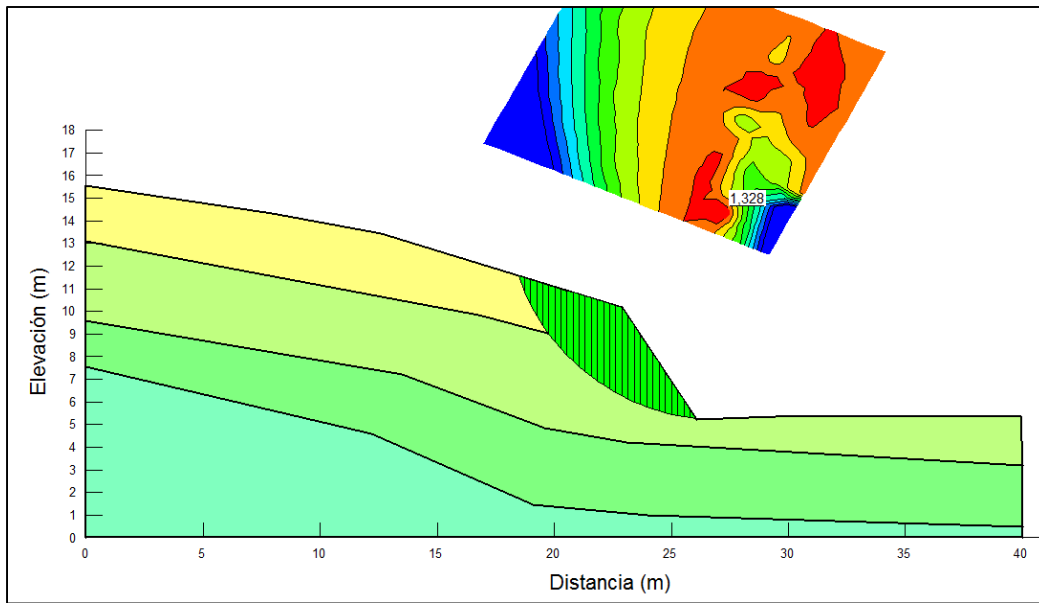
Análisis de la ladera natural del talud T-56 en condición pseudoestática con frente húmedo



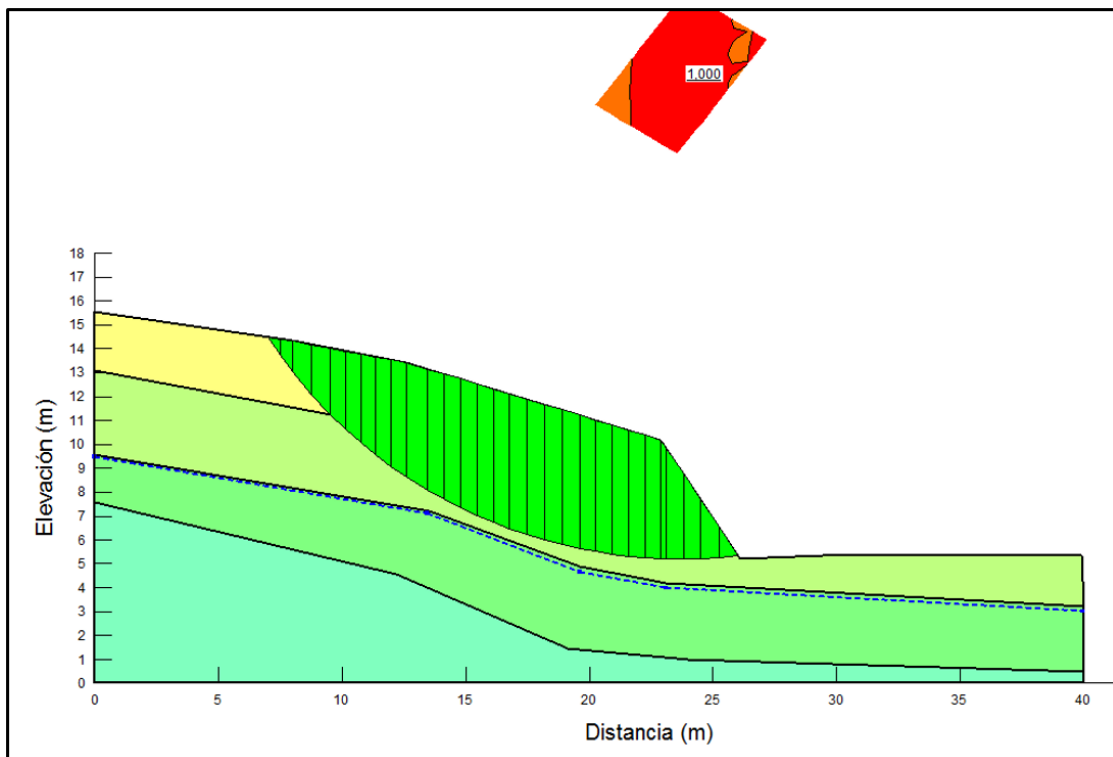
Análisis de la ladera natural del talud T-56 en condición pseudoestática con parámetros UU



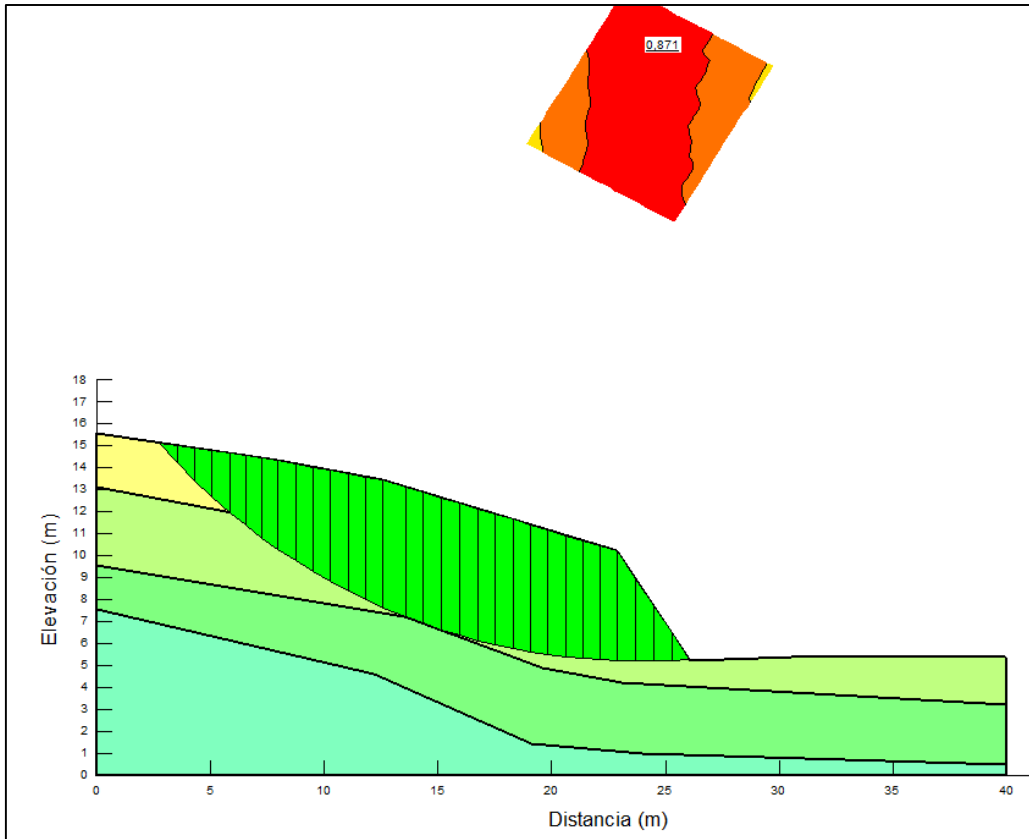
Análisis del corte del talud T-8a en condición estática con NF



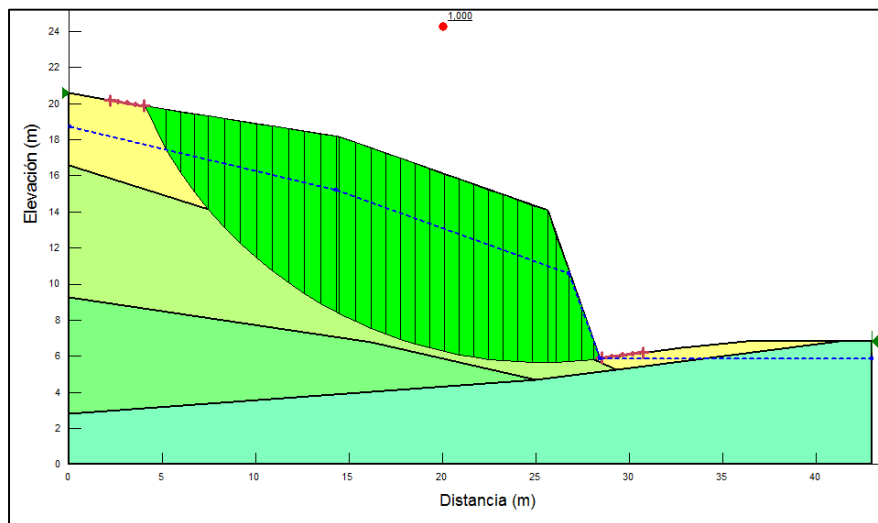
Análisis del corte del talud T-8a en condición estática sin NF



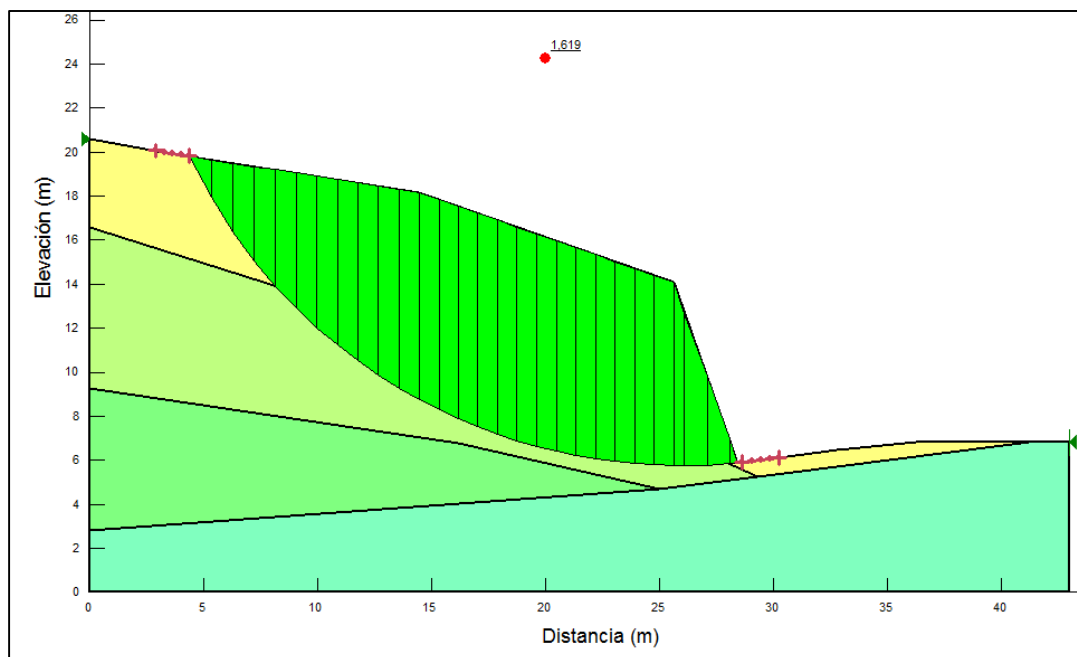
Análisis del corte del talud T-8a en condición frente húmedo



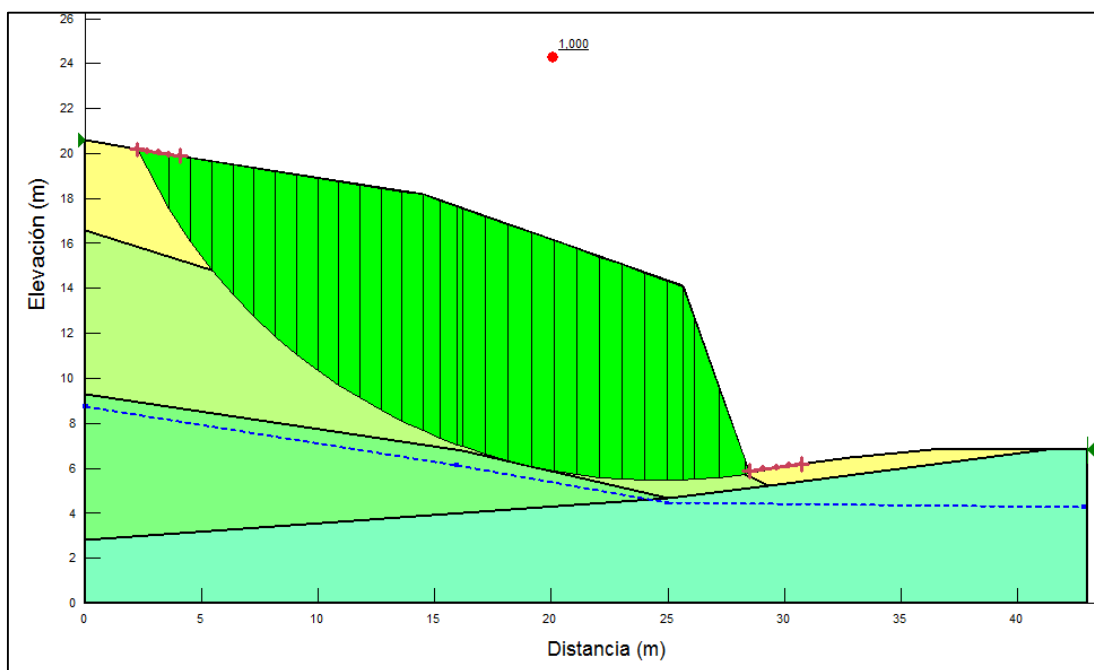
Análisis del corte del talud T-8a en condición pseudoestática con parámetros UU



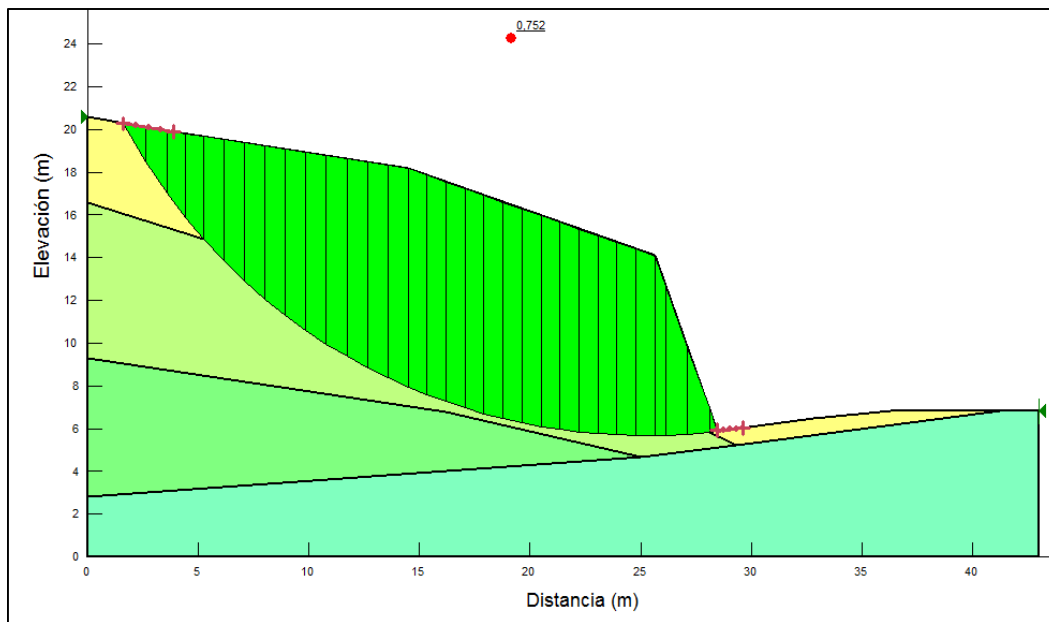
Análisis del corte del talud T-40 en condición estática con NF



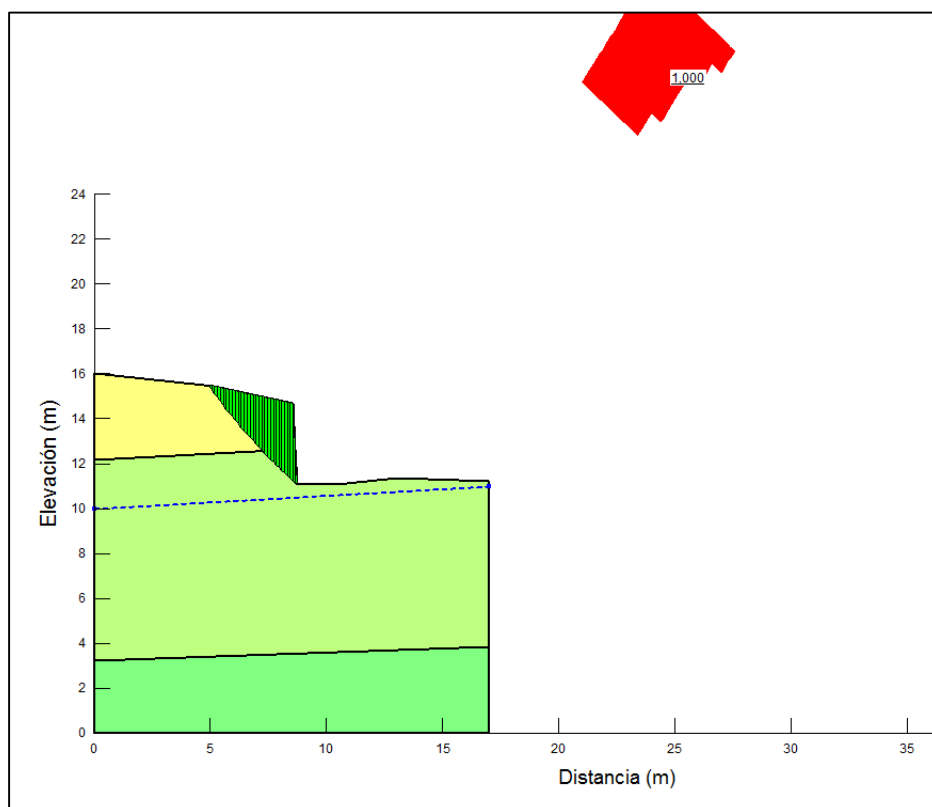
Análisis del corte del talud T-40 en condición estática sin NF



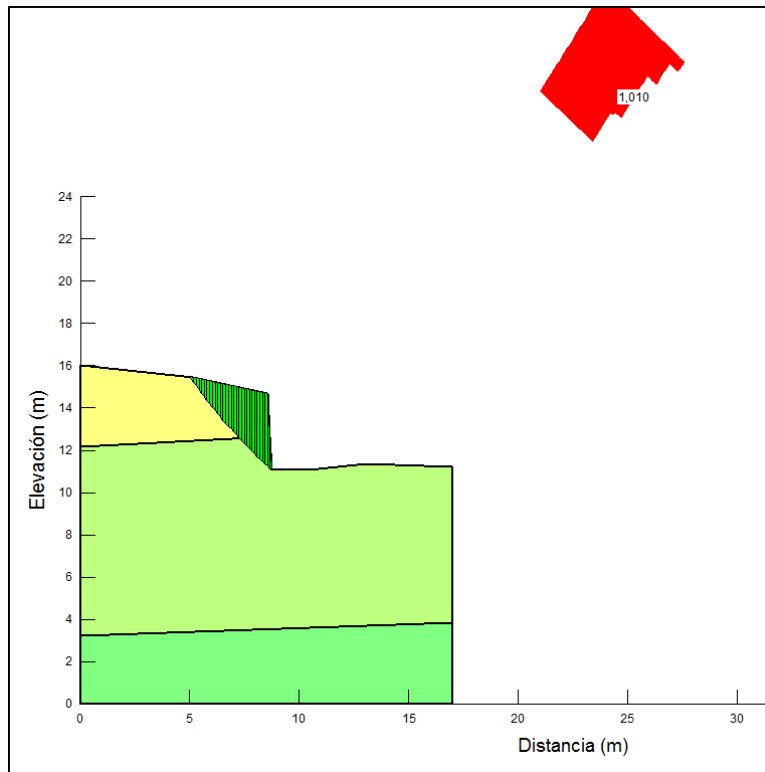
Análisis del corte del talud T-40 en condición frente húmedo



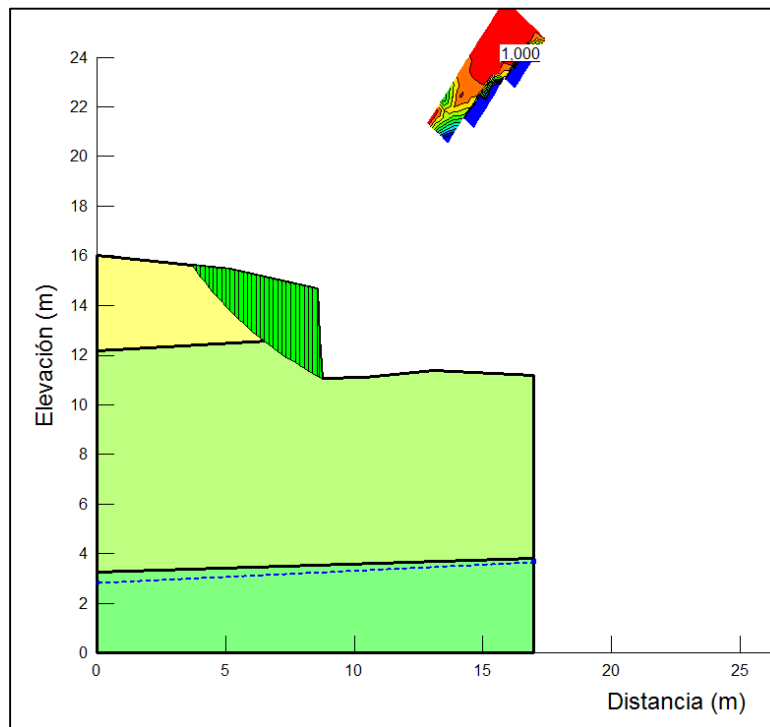
Análisis del corte del talud T-40 en condición pseudoestática con parámetros UU



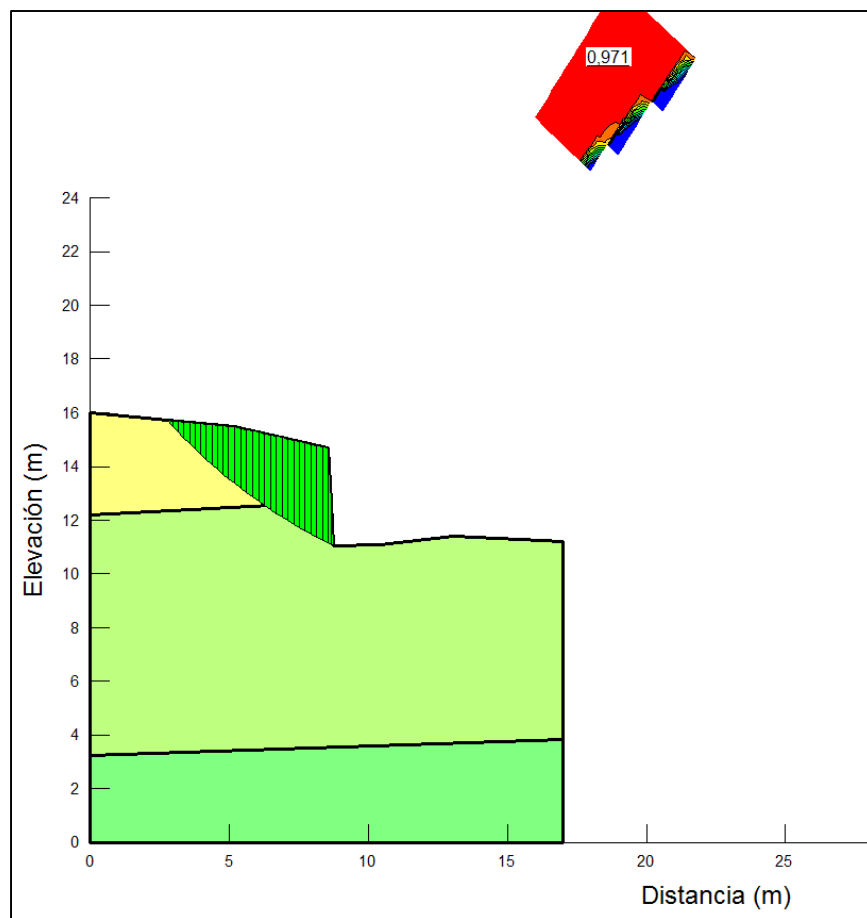
Análisis del corte del talud T-56 en condición estática con NF



Análisis del corte del talud T-56 en condición estática sin NF



Análisis del corte del talud T-56 en condición frente húmedo



Análisis del corte del talud T-56 en condición pseudoestática con parámetros UU

APÉNDICE 6. Sismos reportados en los sitios de los taludes desde el año 2011 hasta el 2015

ID	Fecha	Hora Local	Magnitud	Profundidad en km	Localización	Origen	Reportado	Latitud	Longitud
1	12/7/2011	14:51:00	4,8	10	16 km al Suroeste de Upala	Tectónico por Fallamiento Local	Upala, Guanacaste, Ciudad Quesada, Monte Verde	108.344	-851.145
2	12/7/2011	14:17:00	4,8	5	20km al SO de Upala	Tectónico por Fallamiento Local	Upala, Guanacaste, Ciudad Quesada, Monte Verde	107.402	-851.145
3	12/7/2011	14:11:00	5,3	10	14 km al SO de Upala	Tectónico por Fallamiento Local	Upala, Guanacaste, Ciudad Quesada, Monte Verde	108.113	-851.165
4	13/7/2011	6:47:00	3,2	10	23km al SO de Upala	Tectónico por Fallamiento Local	Zona Norte	10.789	-851.995
5	13/2/2012	4:55:00	6	11	44 Km al Sur de Quepos	Tectónico por Subducción	Todo el país	90.294	-841.199
6	7/8/2012	10:11:00	5	89	8 km Sur Oeste de Ciudad Quesada	Subducción	Ciudad Quesada fuerte, leve en Valle Central	10.249	-84.424
7	5/9/2012	8:42:00	7,6	35	20 km al Sur de Samara	Subducción	Todo el país	9.696	-85.49
8	23/10/2012	18:45:00	6,6	20	18 km sur de Sámara	Subducción	Todo el país	9.718	-85.586
9	9/1/2013	14:53:00	3,5	25	4km al SO de Playa Samara	Tectónico por subducción	Zona Norte	98.471	-855.544
10	17/1/2014	15:02:00	5,3	20	30km SE de Cobano	Subducción	Zona Norte, Valle Central y Pacifico Central	9.51	-84.856
11	6/10/2014	22:28:00	5,3	180	35 km al noroeste de Penas Blancas	Subducción	Zona Norte de Costa Rica	114.921	-857.634
12	13/10/2014	21:51:00	7,3	67	67 Km Oeste Suroeste de Jiquilillo. Nicaragua	Subducción	Costa Rica, El Salvador, Nicaragua y Guatemala	12.576	-88.046
13	28/4/2015	1:33:23	5	76	16.5 km al norte de Miramar de Puntarenas	subducción de la placa del Coco	Todas las provincias excepto Limón	102.294	-847.056
14	31/12/2015	4:57:00	5,9	45	47 km al oeste de Cabo Santa Elena, Península de Santa Elena	Subducción	Zona Norte de Costa Rica	108.068	-863.796

Fuente: Recopilado de <http://www.ovsicori.una.ac.cr/>

CAPÍTULO 8 . ANEXOS

ANEXO 1. Cuadros para la clasificación de Bieniawski (1989), RMR

Parámetros e intervalo de valores para la clasificación geomecánica RMR

PARÁMETRO		RANGO DE VALORES							
1	Resistencia de la roca intacta	Ensayo Carga puntual	> 10 MPa	4 – 10 MPa	2 – 4 MPa	1 – 2 MPa			
		Compresión simple	> 250 MPa	100 – 250 MPa	50 – 100 MPa	25 – 50 MPa	5 – 25 MPa	1 – 5 MPa	< 1 MPa
	VALOR		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90 – 100 %	75 – 90 %	50 – 75 %	25 – 50 %	< 25%		
	VALOR		20	17	13	8	3		
3	Espaciado de las discontinuidades		> 2 m	0.6 – 2 m	0.2 – 0.6 m	6 – 20 cm	< 6 cm		
	VALOR		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	> 20 m		
		VALOR	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0.1 mm	0.1 – 1.0 mm	1 – 5 mm	> 5 mm		
		VALOR	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		VALOR	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno Duro < 5 mm	Relleno Duro > 5 mm	Relleno Blando < 5 mm	Relleno Blando > 5 mm		
		VALOR	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		VALOR	6	5	3	1	0		
VALOR		30	23	13	6	0			
5	Flujo de agua en las discontinuidades	Relación P agua / σ principal	0	0 – 0.1	0.1 – 0.2	0.2 – 0.5	> 0.5		
		Condiciones Generales	Completamente secas	Ligeramente Húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo		
	VALOR		15	10	7	4	0		

Fuente: Tomado de Bazán (2012)

Ajuste de valores por la orientación de las discontinuidades

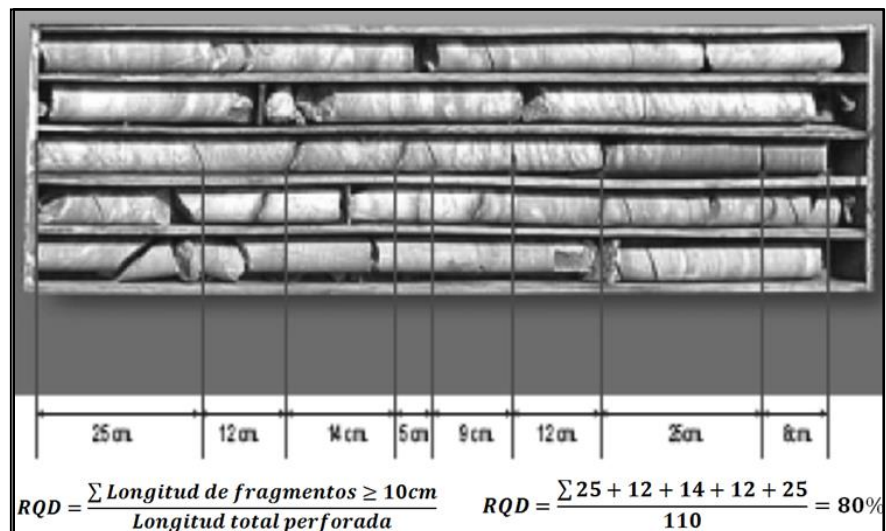
ORIENTACION DEL RUMBO Y BUZAMIENTO DE LAS DISCONTINUIDADES		MUY FAVORABLE	FAVORABLE	REGULAR	DESFAVORABLE	MUY DESFAVORABLE
VALORES	TUNELES Y MINAS	0	-2	-5	-10	-12
	CIMENTACIONES	0	-2	-7	-15	-25
	TALUDES	0	-5	-25	-50	-60

Fuente: Tomado de Monge & Ramírez (2004)

Ejemplo de directrices para realizar tanto el ensayo con el martillo de geólogo como el ensayo manual

Grado	Descripción	Resistencia (Mpa)	Ensayo de identificación
S1	Arcila muy blanda	< 0,025	Se penetra fácilmente con la mano varias pulgadas.
S2	Arcilla blanda	0,025 - 0,05	Se penetra fácilmente con el pulgar varias pulgadas.
S3	Arcilla firme	0,05 - 0,10	Se penetra con el pulgar con esfuerzo moderado.
S4	Arcilla rígida	0,10 - 0,25	Se desmenuza con el pulgar, pero se penetra con mucho esfuerzo.
S5	Arcilla muy rígida	0,25 - 0,50	Se desmenuza con la uña del pulgar.
S6	Arcilla dura	> 0,50	Se pulveriza con el martillo.
R0	Roca extremadamente blanda	0,25 - 1	Se desmenuza con dificultad con la uña del pulgar.
R1	Roca muy blanda	1 - 5	Se pulveriza con el martillo. Se raya con la navaja.
R2	Roca blanda	5 - 25	Se indenta la punta del martillo. Se raya con dificultad con la navaja.
R3	Roca de resistencia media	25 - 50	Se fractura con el martillo. No se raya ni araña con la navaja.
R4	Roca dura	50 - 100	Se necesita más de un martillazo para fracturarla.
R5	Roca muy dura	100 - 250	Se necesitan muchos martillazos para fracturarla.
R6	Extremadamente dura	> 250	Con el martillo sólo se consigue que salten lascas.

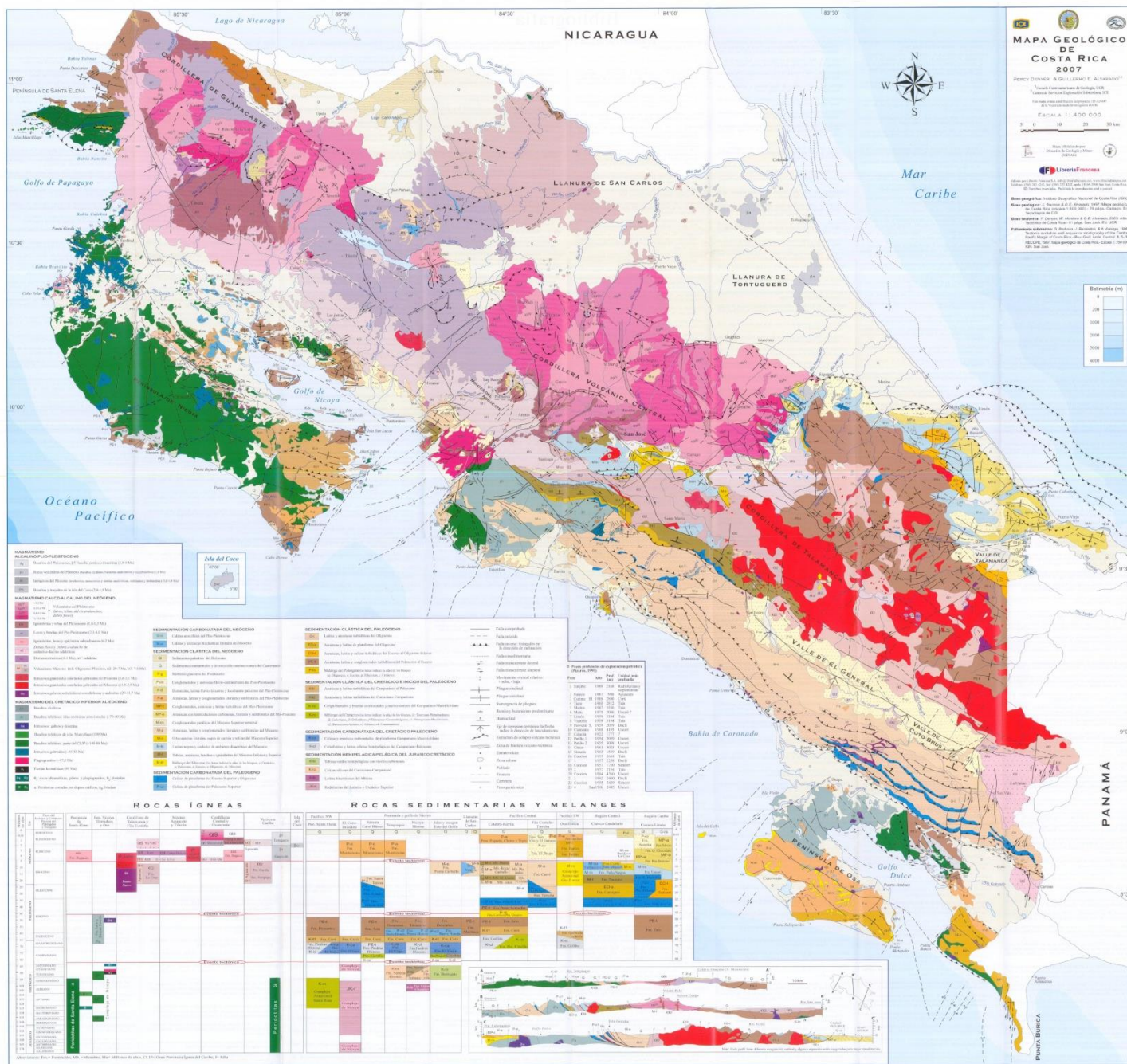
Fuente: Galván (2011)



Estimación del RQD a partir de testigos de sondeo

Fuente: Monge & Ramírez (2004)

ANEXO 2. Mapa geológico de Costa Rica



ANEXO 3. Ensayos de granulometría y clasificación de suelos

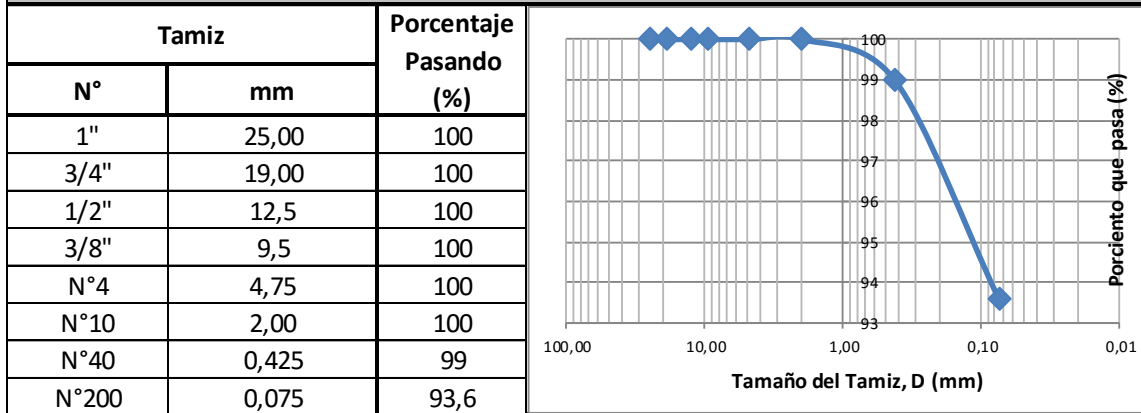
Talud T-8a.1.

CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)*			
SONDEO:	TALUD T-8a	PROF (m):	CAPA 1: 0,00-2,50
GRANULOMETRIA: AASHTO T-27/11*			
Tamiz		Porcentaje Pasando (%)	
N°	mm		
1"	25,00		
3/4"	19,00		
1/2"	12,5		
3/8"	9,5		
N°4	4,75		
N°10	2,00		
N°40	0,425		
N°200	0,075		
% Grava:		0	% Arena:
		1	% Finos:
		99	
LIMITES DE ATTERBERG: AASHTO T-89/90*			
LIMITE LIQUIDO (LL):		72	LIMITE PLÁSTICO (LP):
INDICE DE PLASTICIDAD (IP):		29,0	HUMEDAD EN SITIO (ω):
		43,0	58,8
CLASIFICACION (SUCS)*			
SIMBOLO:		MH	DESCRIPCIÓN:
		Limo de alta plasticidad	
		Color rojizo	
FECHA:		30/06/2014	
		*ENSAYO ACREDITADO. Ver alcance en www.eca.or.cr	
		** ENSAYO NO ACREDITADO	

CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)*

SONDEO: TALUD T-8a PROF (m): CAPA 2: 2,50-6,00

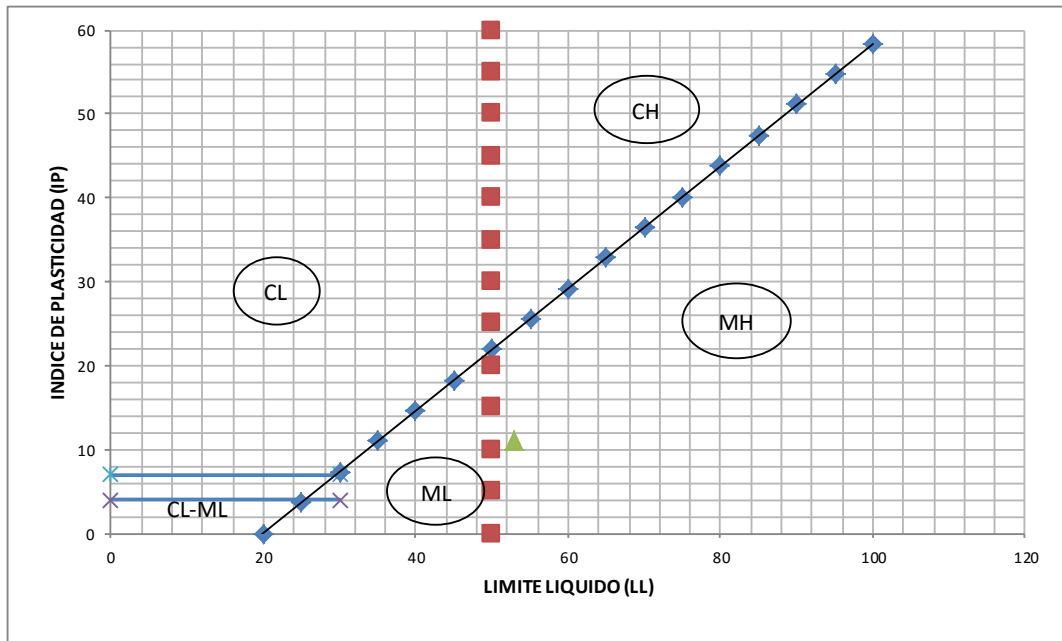
GRANULOMETRIA: AASHTO T-27/11*



% Grava: 0 % Arena: 6,4 % Finos: 93,6

LIMITE DE ATTERBERG: AASHTO T-89/90*

LIMITE LIQUIDO (LL): 53 LIMITE PLÁSTICO (LP): 42,0
 INDICE DE PLASTICIDAD (IP): 11,0 HUMEDAD EN SITIO (ω): 49,0



CLASIFICACION (SUCS)*

SIMBOLO: MH

DESCRIPCIÓN:

Limo de alta plasticidad

Color gris rojizo con manchas de oxidación

FECHA: 30/06/2014

*ENSAYO ACREDITADO. Ver alcance en www.eca.or.cr

** ENSAYO NO ACREDITADO

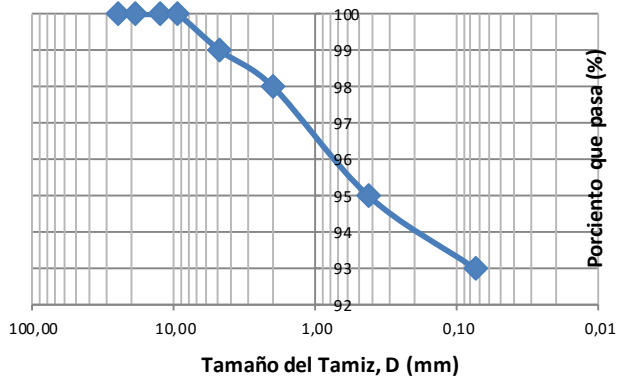
CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)*			
SONDEO:	TALUD T-8a	PROF (m):	CAPA 3: 6,00-8,00
GRANULOMETRIA: AASHTO T-27/11*			
Tamiz		Porcentaje Pasando (%)	
N°	mm		
1"	25,00	100	
3/4"	19,00	100	
1/2"	12,5	100	
3/8"	9,5	100	
N°4	4,75	100	
N°10	2,00	98	
N°40	0,425	95	
N°200	0,075	94,5	
% Grava:	0	% Arena:	5,5
		% Finos:	94,5
LIMITES DE ATTERBERG: AASHTO T-89/90*			
LIMITE LIQUIDO (LL):	35	LIMITE PLÁSTICO (LP):	31,0
INDICE DE PLASTICIDAD (IP):	4,0	HUMEDAD EN SITIO (ω):	49,5
CLASIFICACION (SUCS)*			
SIMBOLO:	ML	DESCRIPCIÓN:	Limo de baja plasticidad con arena
			Color gris rojizo con manchas de oxidación
FECHA:	30/06/2014		<i>*ENSAYO ACREDITADO. Ver alcance en www.eca.or.cr</i> <i>** ENSAYO NO ACREDITADO</i>

CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)*

SONDEO: TALUD T-8a PROF (m): CAPA 4: 8,00-10,00

GRANULOMETRIA: AASHTO T-27/11*

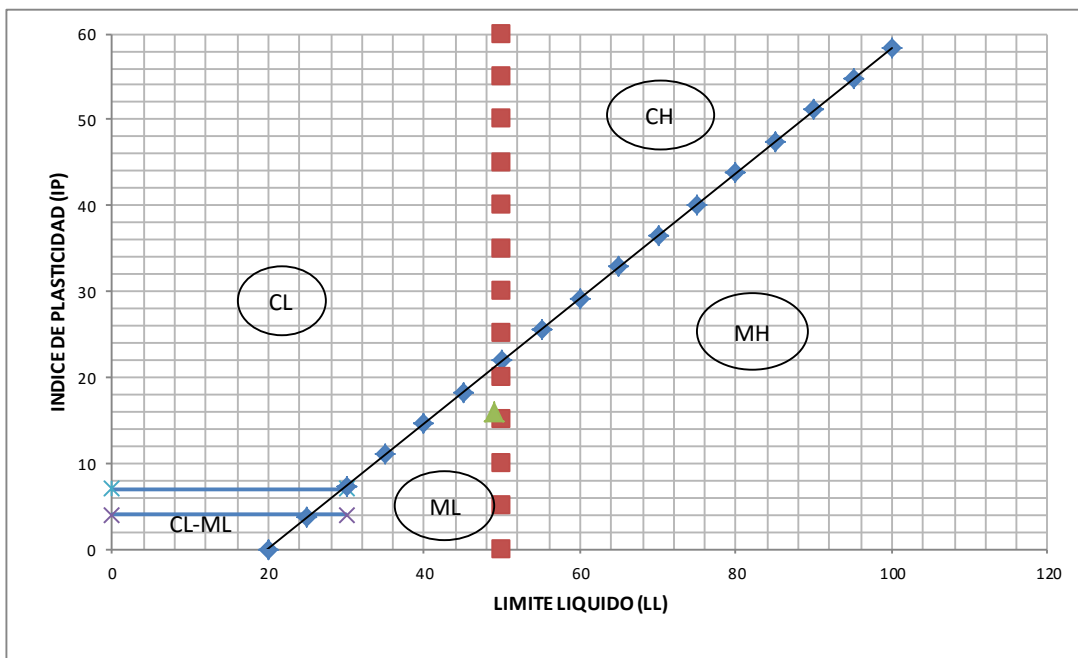
Tamiz		Porcentaje Pasando (%)
N°	mm	
1"	25,00	100
3/4"	19,00	100
1/2"	12,5	100
3/8"	9,5	100
N°4	4,75	99
N°10	2,00	98
N°40	0,425	95
N°200	0,075	93



% Grava: 1 % Arena: 6 % Finos: 93

LIMITE DE ATTERBERG: AASHTO T-89/90*

LIMITE LIQUIDO (LL): 49 LIMITE PLÁSTICO (LP): 33,0
 INDICE DE PLASTICIDAD (IP): 16,0 HUMEDAD EN SITIO (ω): 45,0



CLASIFICACION (SUCS)*

SIMBOLO: ML DESCRIPCIÓN: Limo de baja plasticidad con arena

Color gris rojizo con manchas de oxidación

FECHA: 30/06/2014

*ENSAYO ACREDITADO. Ver alcance en www.eca.or.cr

** ENSAYO NO ACREDITADO

Talud T-8a. 2

CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)*						
SONDEO:	TALUD T-8a-2	PROF (m):	CAPA 2: 0,00 - 3,00			
GRANULOMETRIA: AASHTO T-27/11*						
Tamiz		Porcentaje Pasando (%)				
N°	mm					
1"	25,00	100				
3/4"	19,00	100				
1/2"	12,5	100				
3/8"	9,5	100				
N°4	4,75	100				
N°10	2,00	100				
N°40	0,425	98				
N°200	0,075	88,9				
% Grava:		0	% Arena:	11,1	% Finos:	88,9
LIMITES DE ATTERBERG: AASHTO T-89/90*						
LIMITE LIQUIDO (LL):		65	LIMITE PLÁSTICO (LP):		41,0	
INDICE DE PLASTICIDAD (IP):		24,0	HUMEDAD EN SITIO (ω):		57,3	
CLASIFICACION (SUCS)*						
SIMBOLO:		MH	DESCRIPCIÓN:			
			Limo de alta plasticidad			
			Color gris rojizo con manchas de oxidación			
FECHA:		30/06/2014		*ENSAYO ACREDITADO. Ver alcance en www.eca.or.cr		
				** ENSAYO NO ACREDITADO		

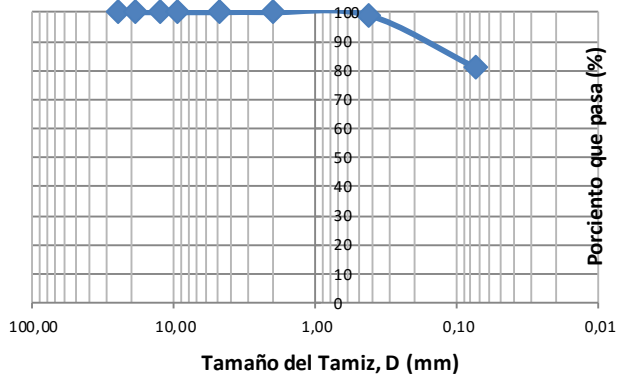
CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)*			
SONDEO:	TALUD T-8a-2	PROF (m):	CAPA 3: 3,00 - 6,50
GRANULOMETRIA: AASHTO T-27/11*			
Tamiz		Porcentaje Pasando (%)	
N°	mm		
1"	25,00	100	
3/4"	19,00	100	
1/2"	12,5	100	
3/8"	9,5	100	
N°4	4,75	100	
N°10	2,00	100	
N°40	0,425	97	
N°200	0,075	96	
% Grava:	0	% Arena:	4
		% Finos:	96
LIMITES DE ATTERBERG: AASHTO T-89/90*			
LIMITE LIQUIDO (LL):	52	LIMITE PLÁSTICO (LP):	31,0
INDICE DE PLASTICIDAD (IP):	21,0	HUMEDAD EN SITIO (ω):	48,4
CLASIFICACION (SUCS)*			
SIMBOLO:	ML	DESCRIPCIÓN:	Limo de baja plasticidad
			Color gris rojizo con manchas de oxidación
FECHA:	30/06/2014		
	*ENSAYO ACREDITADO. Ver alcance en www.eca.or.cr		
	** ENSAYO NO ACREDITADO		

CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)*

SONDEO: TALUD T-8a-2 PROF (m): CAPA 4: 6,50 - 7,50

GRANULOMETRIA: AASHTO T-27/11*

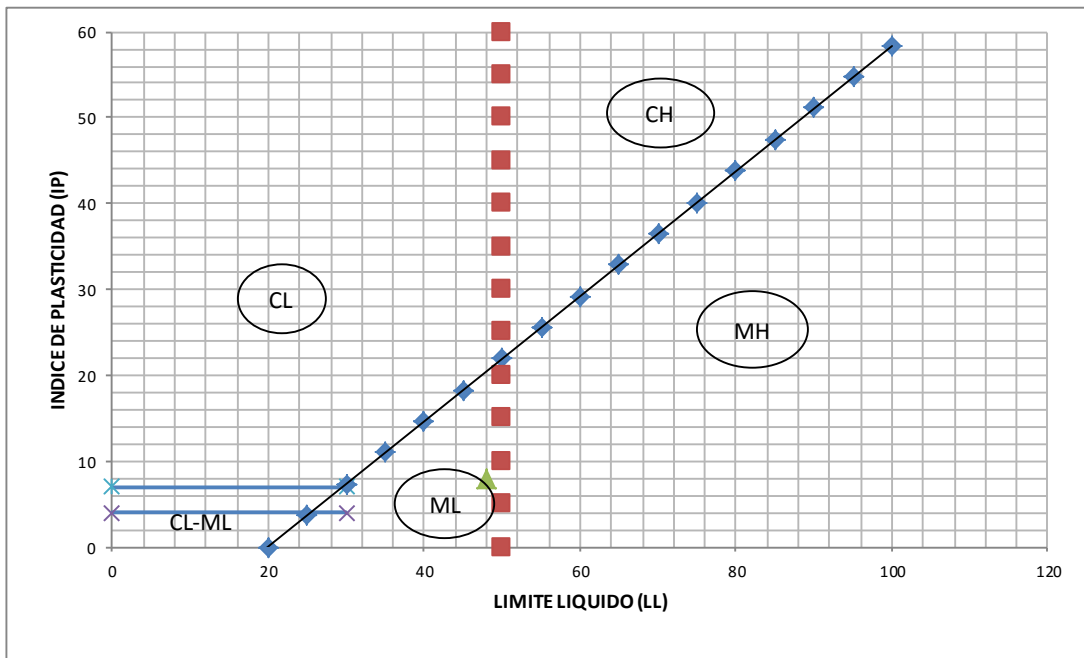
Tamiz		Porcentaje Pasando (%)
N°	mm	
1"	25,00	100
3/4"	19,00	100
1/2"	12,5	100
3/8"	9,5	100
N°4	4,75	100
N°10	2,00	100
N°40	0,425	99
N°200	0,075	81,1



% Grava: 0 % Arena: 18,9 % Finos: 81,1

LIMITE DE ATTERBERG: AASHTO T-89/90*

LIMITE LIQUIDO (LL):	48	LIMITE PLÁSTICO (LP):	40,0
INDICE DE PLASTICIDAD (IP):	8,0	HUMEDAD EN SITIO (ω):	50,0



CLASIFICACION (SUCS)*

SIMBOLO: ML

DESCRIPCIÓN:

Limo de baja plasticidad

Color gris rojizo con manchas de oxidación

FECHA: 30/06/2014

*ENSAYO ACREDITADO. Ver alcance en www.eca.or.cr

** ENSAYO NO ACREDITADO

Talud T-40.1

CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)*			
SONDEO:	TALUD T-40.1	PROF (m):	CAPA 1: 0,00-0,50
GRANULOMETRIA: AASHTO T-27/11*			
Tamiz		Porcentaje Pasando (%)	
N°	mm		
1"	25,00	100	
3/4"	19,00	100	
1/2"	12,5	100	
3/8"	9,5	100	
N°4	4,75	100	
N°10	2,00	99	
N°40	0,425	97	
N°200	0,075	90,1	
% Grava:	0	% Arena:	9,9
		% Finos:	90,1
LIMITES DE ATTERBERG: AASHTO T-89/90*			
LIMITE LIQUIDO (LL):	71	LIMITE PLÁSTICO (LP):	46,0
INDICE DE PLASTICIDAD (IP):	25,0	HUMEDAD EN SITIO (ω):	34,0
CLASIFICACION (SUCS)*			
SÍMBOLO:	MH	DESCRIPCIÓN:	Limo de alta plasticidad
			Color gris rojizo con manchas de oxidación
FECHA:	30/06/2014		*ENSAYO ACREDITADO. Ver alcance en www.eca.or.cr
			** ENSAYO NO ACREDITADO

CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)*			
SONDEO:	TALUD T-40.1	PROF (m):	CAPA 2: 0,50-2,50
GRANULOMETRIA: AASHTO T-27/11*			
Tamiz		Porcentaje Pasando (%)	
N°	mm		
1"	25,00		
3/4"	19,00		
1/2"	12,5		
3/8"	9,5		
N°4	4,75		
N°10	2,00		
N°40	0,425		
N°200	0,075		
% Grava:	0	% Arena:	17,8
		% Finos:	82,2
LIMITES DE ATTERBERG: AASHTO T-89/90*			
LIMITE LIQUIDO (LL):	41	LIMITE PLÁSTICO (LP):	28,0
INDICE DE PLASTICIDAD (IP):	13,0	HUMEDAD EN SITIO (ω):	28,8
CLASIFICACION (SUCS)*			
SÍMBOLO:	ML	DESCRIPCIÓN:	Limo de baja plasticidad
			<i>Color gris rojizo con manchas de oxidación</i>
FECHA:	30/06/2014		
	<small>*ENSAYO ACREDITADO. Ver alcance en www.eca.or.cr</small> <small>** ENSAYO NO ACREDITADO</small>		

CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)*			
SONDEO:	TALUD T-40.1	PROF (m):	CAPA 4: 2,50-3,00
GRANULOMETRIA: AASHTO T-27/11*			
Tamiz		Porcentaje Pasando (%)	
N°	mm		
1"	25,00	100	
3/4"	19,00	100	
1/2"	12,5	100	
3/8"	9,5	100	
N°4	4,75	100	
N°10	2,00	99	
N°40	0,425	93	
N°200	0,075	80,8	
% Grava:	0	% Arena:	19,2
		% Finos:	80,8
LIMITES DE ATTERBERG: AASHTO T-89/90*			
LIMITE LIQUIDO (LL):	43	LIMITE PLÁSTICO (LP):	35,0
INDICE DE PLASTICIDAD (IP):	8,0	HUMEDAD EN SITIO (ω):	18,0
CLASIFICACION (SUCS)*			
SIMBOLO:	ML	DESCRIPCIÓN:	Limo de baja plasticidad
			Color gris rojizo con manchas de oxidación
FECHA:	30/06/2014		*ENSAYO ACREDITADO. Ver alcance en www.eca.or.cr
			** ENSAYO NO ACREDITADO

Talud T-40.2

CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)*			
SONDEO:	TALUD T-40.2	PROF (m):	CAPA 1: 0,00-0,50
GRANULOMETRIA: AASHTO T-27/11*			
Tamiz		Porcentaje Pasando (%)	
N°	mm		
1"	25,00	100	
3/4"	19,00	100	
1/2"	12,5	100	
3/8"	9,5	100	
N°4	4,75	100	
N°10	2,00	100	
N°40	0,425	96	
N°200	0,075	91,5	
% Grava:	0	% Arena:	
		% Finos:	91,5
LIMITES DE ATTERBERG: AASHTO T-89/90*			
LIMITE LIQUIDO (LL):	75	LIMITE PLÁSTICO (LP):	41,0
INDICE DE PLASTICIDAD (IP):	34,0	HUMEDAD EN SITIO (ω):	32,0
CLASIFICACION (SUCS)*			
SIMBOLO:	MH	DESCRIPCIÓN:	Limo de alta plasticidad
			<i>Color gris rojizo con manchas de oxidación</i>
FECHA:	30/06/2014		
	<small>*ENSAYO ACREDITADO. Ver alcance en www.eca.or.cr</small> <small>** ENSAYO NO ACREDITADO</small>		

CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)*			
SONDEO:	TALUD T-40.2	PROF (m):	CAPA 2: 0,50-5,00
GRANULOMETRIA: AASHTO T-27/11*			
Tamiz		Porcentaje Pasando (%)	
N°	mm		
1"	25,00	100	
3/4"	19,00	100	
1/2"	12,5	100	
3/8"	9,5	100	
N°4	4,75	100	
N°10	2,00	100	
N°40	0,425	100	
N°200	0,075	93,6	
% Grava:	0	% Arena:	6,4
		% Finos:	93,6
LIMITES DE ATTERBERG: AASHTO T-89/90*			
LIMITE LIQUIDO (LL):	41	LIMITE PLÁSTICO (LP):	28,0
INDICE DE PLASTICIDAD (IP):	13,0	HUMEDAD EN SITIO (ω):	34,3
CLASIFICACION (SUCS)*			
SIMBOLO:	ML	DESCRIPCIÓN:	Limo de baja plasticidad
			Color gris rojizo con manchas de oxidación
FECHA:	30/06/2014		
	*ENSAYO ACREDITADO. Ver alcance en www.eca.or.cr		
	** ENSAYO NO ACREDITADO		

CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)*			
SONDEO:	TALUD T-40.2	PROF (m):	CAPA 3: 5,00-8,00
GRANULOMETRIA: AASHTO T-27/11*			
Tamiz		Porcentaje Pasando (%)	
N°	mm		
1"	25,00	100	
3/4"	19,00	100	
1/2"	12,5	100	
3/8"	9,5	100	
N°4	4,75	100	
N°10	2,00	100	
N°40	0,425	100	
N°200	0,075	96,1	
% Grava:	0	% Arena:	3,9
		% Finos:	96,1
LIMITES DE ATTERBERG: AASHTO T-89/90*			
LIMITE LIQUIDO (LL):	38	LIMITE PLÁSTICO (LP):	26,0
INDICE DE PLASTICIDAD (IP):	12,0	HUMEDAD EN SITIO (ω):	30,3
CLASIFICACION (SUCS)*			
SIMBOLO:	ML	DESCRIPCIÓN:	Limo de baja plasticidad
			Color gris rojizo con manchas de oxidación
FECHA:	30/06/2014		
	*ENSAYO ACREDITADO. Ver alcance en www.eca.or.cr		
	** ENSAYO NO ACREDITADO		

CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)*			
SONDEO:	TALUD T-40.2	PROF (m):	CAPA 4: 8,00-9,50
GRANULOMETRIA: AASHTO T-27/11*			
Tamiz		Porcentaje Pasando (%)	
N°	mm		
1"	25,00	100	
3/4"	19,00	100	
1/2"	12,5	100	
3/8"	9,5	100	
N°4	4,75	100	
N°10	2,00	100	
N°40	0,425	99	
N°200	0,075	92,3	
% Grava:	0	% Arena:	7,7
		% Finos:	92,3
LIMITES DE ATTERBERG: AASHTO T-89/90*			
LIMITE LIQUIDO (LL):	35	LIMITE PLÁSTICO (LP):	25,0
INDICE DE PLASTICIDAD (IP):	10,0	HUMEDAD EN SITIO (ω):	26,0
CLASIFICACION (SUCS)*			
SIMBOLO:	ML	DESCRIPCIÓN:	Limo de baja plasticidad
			<i>Color gris rojizo con manchas de oxidación</i>
FECHA:	30/06/2014	<i>*ENSAYO ACREDITADO. Ver alcance en www.eca.or.cr</i> <i>** ENSAYO NO ACREDITADO</i>	

Talud T-40.3

CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)*			
SONDEO:	TALUD T-40.3	PROF (m):	CAPA 1 : 0,00-4,00
GRANULOMETRIA: AASHTO T-27/11*			
Tamiz		Porcentaje Pasando (%)	
N°	mm		
1"	25,00	100	
3/4"	19,00	100	
1/2"	12,5	100	
3/8"	9,5	100	
N°4	4,75	100	
N°10	2,00	100	
N°40	0,425	99	
N°200	0,075	98,4	
% Grava:	0	% Arena:	1,6
		% Finos:	98,4
LIMITES DE ATTERBERG: AASHTO T-89/90*			
LIMITE LIQUIDO (LL):	76	LIMITE PLÁSTICO (LP):	59,0
INDICE DE PLASTICIDAD (IP):	17,0	HUMEDAD EN SITIO (ω):	51,9
CLASIFICACION (SUCS)*			
SÍMBOLO:	MH	DESCRIPCIÓN:	Limo de alta plasticidad
		Color gris rojizo con manchas de oxidación	
FECHA:	30/06/2014		*ENSAYO ACREDITADO. Ver alcance en www.eca.or.cr
			** ENSAYO NO ACREDITADO

CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)*			
SONDEO:	TALUD T-40.3	PROF (m):	CAPA 2 : 4,00-10,00
GRANULOMETRÍA: AASHTO T-27/11*			
Tamiz		Porcentaje Pasando (%)	
N°	mm		
1"	25,00	100	
3/4"	19,00	100	
1/2"	12,5	100	
3/8"	9,5	100	
N°4	4,75	100	
N°10	2,00	98	
N°40	0,425	95	
N°200	0,075	91,7	
% Grava:	0	% Arena:	8,3
		% Finos:	91,7
LIMITES DE ATTERBERG: AASHTO T-89/90*			
LIMITE LIQUIDO (LL):	42	LIMITE PLÁSTICO (LP):	30,0
INDICE DE PLASTICIDAD (IP):	12,0	HUMEDAD EN SITIO (ω):	61,8
CLASIFICACION (SUCS)*			
SIMBOLO:	ML	DESCRIPCIÓN:	Limo de baja plasticidad
			Color gris rojizo con manchas de oxidación
FECHA:	30/06/2014		
	*ENSAYO ACREDITADO. Ver alcance en www.eca.or.cr		
	** ENSAYO NO ACREDITADO		

CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)*			
SONDEO:	TALUD T-40.3	PROF (m):	CAPA 3 : 10,00-15,00
GRANULOMETRIA: AASHTO T-27/11*			
Tamiz		Porcentaje Pasando (%)	
N°	mm		
1"	25,00	100	
3/4"	19,00	100	
1/2"	12,5	100	
3/8"	9,5	100	
N°4	4,75	100	
N°10	2,00	100	
N°40	0,425	100	
N°200	0,075	87,2	
% Grava:	0	% Arena:	12,8
		% Finos:	87,2
LIMITES DE ATTERBERG: AASHTO T-89/90*			
LIMITE LIQUIDO (LL):	50	LIMITE PLÁSTICO (LP):	34,0
INDICE DE PLASTICIDAD (IP):	16,0	HUMEDAD EN SITIO (ω):	55,1
CLASIFICACION (SUCS)*			
SIMBOLO:	ML	DESCRIPCIÓN:	Limo de baja plasticidad
			Color gris rojizo con manchas de oxidación
FECHA:	30/06/2014		<i>*ENSAYO ACREDITADO. Ver alcance en www.eca.or.cr</i> <i>** ENSAYO NO ACREDITADO</i>

CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)*			
SONDEO:	TALUD T-40.3	PROF (m):	CAPA 4 : 15,00-16,00
GRANULOMETRIA: AASHTO T-27/11*			
Tamiz		Porcentaje Pasando (%)	
N°	mm		
1"	25,00	100	
3/4"	19,00	100	
1/2"	12,5	100	
3/8"	9,5	100	
N°4	4,75	100	
N°10	2,00	100	
N°40	0,425	99	
N°200	0,075	90,8	
% Grava:	0	% Arena:	9,2
		% Finos:	90,8
LIMITES DE ATTERBERG: AASHTO T-89/90*			
LIMITE LIQUIDO (LL):	43	LIMITE PLÁSTICO (LP):	28,0
INDICE DE PLASTICIDAD (IP):	15,0	HUMEDAD EN SITIO (ω):	54,7
CLASIFICACION (SUCS)*			
SIMBOLO:	ML	DESCRIPCIÓN:	Limo de baja plasticidad
			Color gris rojizo con manchas de oxidación
FECHA:	30/06/2014		
	*ENSAYO ACREDITADO. Ver alcance en www.eca.or.cr		
	** ENSAYO NO ACREDITADO		

Talud T-56.1

CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)*			
SONDEO:	TALUD T-56.1	PROF (m):	CAPA 1 : 0,00-3,50
GRANULOMETRIA: AASHTO T-27/11*			
Tamiz		Porcentaje Pasando (%)	
N°	mm		
1"	25,00	100	
3/4"	19,00	100	
1/2"	12,5	100	
3/8"	9,5	100	
N°4	4,75	100	
N°10	2,00	100	
N°40	0,425	98	
N°200	0,075	94,6	
% Grava:	0	% Arena:	5,4
		% Finos:	94,6
LIMITES DE ATTERBERG: AASHTO T-89/90*			
LIMITE LIQUIDO (LL):	78	LIMITE PLÁSTICO (LP):	42,0
INDICE DE PLASTICIDAD (IP):	36,0	HUMEDAD EN SITIO (ω):	45,1
CLASIFICACION (SUCS)*			
SÍMBOLO:	MH	DESCRIPCIÓN:	Limo de alta plasticidad
			Color gris rojizo con manchas de oxidación
FECHA:	30/06/2014		
	*ENSAYO ACREDITADO. Ver alcance en www.eca.or.cr ** ENSAYO NO ACREDITADO		

CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)*			
SONDEO:	TALUD T-56.1	PROF (m):	CAPA 2 : 3,50-12,50
GRANULOMETRIA: AASHTO T-27/11*			
Tamiz		Porcentaje Pasando (%)	
N°	mm		
1"	25,00	100	
3/4"	19,00	100	
1/2"	12,5	100	
3/8"	9,5	100	
N°4	4,75	100	
N°10	2,00	99	
N°40	0,425	97	
N°200	0,075	93,8	
% Grava:	0	% Arena:	6,2
		% Finos:	93,8
LIMITES DE ATTERBERG: AASHTO T-89/90*			
LIMITE LIQUIDO (LL):	80	LIMITE PLÁSTICO (LP):	49,0
INDICE DE PLASTICIDAD (IP):	31,0	HUMEDAD EN SITIO (ω):	53,9
CLASIFICACION (SUCS)*			
SIMBOLO:	MH	DESCRIPCIÓN:	Limo de alta plasticidad
			Color gris rojizo con manchas de oxidación
FECHA:	30/06/2014		
	*ENSAYO ACREDITADO. Ver alcance en www.eca.or.cr		
	** ENSAYO NO ACREDITADO		

CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)*			
SONDEO:	TALUD T-56.1	PROF (m):	CAPA 3 : 12,50-13,00
GRANULOMETRIA: AASHTO T-27/11*			
Tamiz		Porcentaje Pasando (%)	
N°	mm		
1"	25,00	100	
3/4"	19,00	100	
1/2"	12,5	100	
3/8"	9,5	100	
N°4	4,75	100	
N°10	2,00	99	
N°40	0,425	99	
N°200	0,075	93,5	
% Grava:	0	% Arena:	6,5
		% Finos:	93,5
LIMITES DE ATTERBERG: AASHTO T-89/90*			
LIMITE LIQUIDO (LL):	33	LIMITE PLÁSTICO (LP):	28,0
INDICE DE PLASTICIDAD (IP):	5,0	HUMEDAD EN SITIO (ω):	65,0
CLASIFICACION (SUCS)*			
SIMBOLO:	ML	DESCRIPCIÓN:	Limo de baja plasticidad
			Color gris rojizo con manchas de oxidación
FECHA:	30/06/2014		*ENSAYO ACREDITADO. Ver alcance en www.eca.or.cr
			** ENSAYO NO ACREDITADO

Talud T-56.2

CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)*						
SONDEO:	TALUD T-56.2	PROF (m):	CAPA 2 : 0,00-7,50			
GRANULOMETRIA: AASHTO T-27/11*						
Tamiz		Porcentaje Pasando (%)				
N°	mm					
1"	25,00	100				
3/4"	19,00	100				
1/2"	12,5	100				
3/8"	9,5	100				
N°4	4,75	100				
N°10	2,00	100				
N°40	0,425	100				
N°200	0,075	93,9				
% Grava:		0	% Arena:	6,1	% Finos:	93,9
LIMITES DE ATTERBERG: AASHTO T-89/90*						
LIMITE LIQUIDO (LL):		53	LIMITE PLÁSTICO (LP):		38,0	
INDICE DE PLASTICIDAD (IP):		15,0	HUMEDAD EN SITIO (ω):		47,1	
CLASIFICACION (SUCS)*						
SIMBOLO:		MH	DESCRIPCIÓN:			
			Limo de alta plasticidad			
			Color gris rojizo con manchas de oxidación			
FECHA:		30/06/2014		*ENSAYO ACREDITADO. Ver alcance en www.eca.or.cr		
				** ENSAYO NO ACREDITADO		

CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)*			
SONDEO:	TALUD T-56.2	PROF (m):	CAPA 3 : 7,50 - 9,00
GRANULOMETRIA: AASHTO T-27/11*			
Tamiz		Porcentaje Pasando (%)	
N°	mm		
1"	25,00	100	
3/4"	19,00	100	
1/2"	12,5	100	
3/8"	9,5	100	
N°4	4,75	100	
N°10	2,00	100	
N°40	0,425	100	
N°200	0,075	86,6	
% Grava:	0	% Arena:	13,4
		% Finos:	86,6
LIMITES DE ATTERBERG: AASHTO T-89/90*			
LIMITE LIQUIDO (LL):	47	LIMITE PLÁSTICO (LP):	35,0
INDICE DE PLASTICIDAD (IP):	12,0	HUMEDAD EN SITIO (ω):	33,3
CLASIFICACION (SUCS)*			
SIMBOLO:	ML	DESCRIPCIÓN:	Limo de baja plasticidad
			Color gris rojizo con manchas de oxidación
FECHA:	30/06/2014		<i>*ENSAYO ACREDITADO. Ver alcance en www.eca.or.cr</i> <i>** ENSAYO NO ACREDITADO</i>